

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Jerčić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Milan Kostelac, dipl. ing.

Student:

Luka Jerčić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se u prvom redu svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Milanu Kostelcu na pomoći i sugestijama pruženim prilikom izrade ovog diplomskog rada. Naravno i svim drugim profesorima na prenesenom znanju. Također zahvaljujem g. Anti Antunoviću, vlasniku broda *Full Pelt* i g. Damiru Majetiću, bivšem vlasniku broda *Cometa*. Josipi Prosinečki zahvalio bih na lekturi teksta. Naposljetku, zahvaljujem obitelji na neupitnoj podršci tijekom studija i razumijevanju moje neizmjerne ljubavi prema jedrenju.

Luka Jerčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JERČIĆ LUKA**

Mat. br.: 0023079301

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Hidraulički uređaj za zakretanje kobilice jedrilice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Hydraulic device for swivelling of the sailboats keel**

Opis zadatka:

Upravljanje jedrilicom daleko je jednostavnije ukoliko se pri plovidbi koristi mogućnost zakretanja kobilice, čime se postiže veća stabilnost broda pri većim brzinama plovidbe. Hidraulički uređaj nije ekonomski isplativ za male jedrilice već za jedrilice duljine iznad 40 stopa.

U radu je potrebno za jedrilicu duljine 40 stopa sljedeće:

1. Analizirati sustave zakretanja kobilice jedrilica;
2. Odabrati koncept zakretanja kobilice za jedrilicu duljine 40 stopa;
3. Koncipirati i proračunati hidraulički sustav;
4. Proračunati i konstruirati mehanizam za zakretanje kobilice vodeći računa o masi uređaja;
5. Izraditi sklopni crtež uređaja s radioničkom dokumentacijom nestandardnih dijelova;
6. Izraditi upute za montažu i održavanje uređaja za zakretanje kobilice.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

12. studenog 2015.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Milan Kostelac

Rok predaje rada:

14. siječnja 2016.

Predviđeni datumi obrane:

20., 21. i 22. siječnja 2016.

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. Uvod .....	1
1.1. Stabilitet broda .....	1
2. Sustavi zakretanja kobilice jedrilica .....	4
2.1. Zakretanje kobilice konopima i užnicama ljudskom snagom .....	4
2.2. Zakretanje kobilice hidrauličkim cilindrima .....	6
2.3. Zakretanje kobilice mehaničkim aktuatorima .....	8
2.4. Zakretanje kobilice pomicanjem kobilice po tračnici na obodu vanjske plohe broda .....	9
2.5. Zakretanje kobilice pomoću zupčanika s unutrašnjim ozubljenjem .....	10
3. Odabir koncepta zakretanja kobilice za jedrilicu duljine 40 stopa .....	12
4. Proračun uređaja za zakretanje kobilice .....	15
4.1. Sile na kobilici .....	16
4.2. Hidraulički cilindar .....	17
4.2.1. Sile na cilindru .....	17
4.2.2. Potreban hod cilindra .....	17
4.2.3. Promjer hidrauličkog cilindra .....	18
4.2.4. Proračun klipnjače .....	21
4.2.5. Izbor užeta .....	24
4.2.6. Užnice .....	24
4.3. Izbor hidrauličkog sustava .....	26
4.3.1. Izbor hidrauličke pumpe .....	26
4.3.2. Izbor elektromotora za pogon pumpe .....	26
4.3.3. Cjevovodi .....	28
4.3.4. Spremnik hidrauličkog ulja .....	28
4.4. Opis hidrauličkog sustava .....	29
4.4.1. Opis prve varijante hidrauličkog sustava .....	29
4.4.2. Opis druge varijante hidrauličkog sustava .....	30
4.4.3. Opis treće varijante hidrauličkog sustava .....	30
5. Montaža uređaja za zakretanje kobilice .....	32
5.1. Zaštita sustava od nepovoljne okoline prije montaže .....	32
5.2. Montaža hidrauličkog sustava .....	32
5.3. Montaža cilindra užnica i užeta .....	32
6. Održavanje .....	34

---

6.1. Održavanje mehanizma za zakretanje .....	34
6.2. Održavanje hidrauličnog sustava i komponenti .....	34
6.2.1. Preventivno održavanje .....	35
6.2.2. Postupak pronalaska greške u radu hidrauličkog sustava .....	36
6.2.3. Čišćenje hidrauličnog sustava .....	37
7. ZAKLJUČAK .....	38
LITERATURA .....	39
PRILOZI .....	40

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Različiti tipovi stabiliziranja jedrilice .....	2
Slika 2.	Krivulje tri tipa broda u ovisnosti ispravljačke poluge i kuta nagiba .....	3
Slika 3.	Grinder i vitlo .....	4
Slika 4.	Sustav zakretanja kobilice konopima i užnicama, brod <i>Cometa</i> .....	5
Slika 5.	Osovina zakretne kobilice, brod <i>Cometa</i> .....	6
Slika 6.	Sustav zakretanja kobilice dvoradnim hidrauličkim cilindrima .....	7
Slika 7.	Kompozitna konstrukcija sustava .....	7
Slika 8.	Sustav zakretanja kobilice jednim dvoradnim cilindrom .....	8
Slika 9.	Mehanički aktuator .....	9
Slika 10.	Planetarni vijci .....	9
Slika 11.	Tračnica za zakretanje .....	10
Slika 12.	Kobilica u položaju iznad mora .....	10
Slika 13.	Kompjuterski model broda <i>Stravaganza</i> .....	11
Slika 14.	Brod <i>Stravaganza</i> .....	11
Slika 15.	Prikaz zakretanja kobilice pomoću jednoradnih cilindara i užeta .....	13
Slika 16.	Uvećani prikaz položaja cilindara kada je kobilica u centralnom položaju .....	13
Slika 17.	Prikaz poluge ispravljanja u odnosu na kut zakreta kobilice i broda .....	14
Slika 18.	Brod <i>Full Pelt</i> nagnut pomoću zakretne kobilice .....	14
Slika 19.	Prikaz stupnjeva zakreta kobilice i broda .....	15
Slika 20.	Sile koje djeluju na kobilicu u vodoravnom položaju .....	16
Slika 21.	Najnepovoljniji slučaj za hidraulički sustav zakretanja kobilice, <i>Mini Transat 650</i> .....	16
Slika 22.	Sile koje djeluju na hidraulički cilindar .....	17
Slika 23.	Prikaz zakreta glave kobilice i pomaka užeta .....	18
Slika 24.	Shema hidrauličkog cilindra .....	19
Slika 25.	Naprezanje u cijevi hidrauličkog cilindra .....	20
Slika 26.	Izvijanje klipnjače hidrauličkog cilindra .....	22
Slika 27.	Veza klipa i klipnjače .....	23
Slika 28.	Užnica u kombinaciji nehrđajućeg čelika i poliamida .....	24
Slika 29.	Ležajna čahura s nosećom površinom .....	25
Slika 30.	Karakteristika elektromotora za pogon pumpe .....	27

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba tri tipa broda s jednakim momentom ispravljanja pri optimalnom nagibu broda



## POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
1	Zakretna kobilica – hidraulička shema var. 1
2	Zakretna kobilica – hidraulička shema var. 2
3	Zakretna kobilica – hidraulička shema var. 3
4	Mehanizam zakretne kobilice
4.1	Podloška
4.2	Osovina užnice
5	Kompozitna užnica
5.1	Kompozitna užnica – glavina i disk užnice
5.2	Kompozitna užnica – bočna ploča
6	Zakretna kobilica – zatezač užeta M14
7	Hidraulički cilindar
7.1	Klip
7.2	Klipnjača
7.3	Cilindar
7.4	Gornja glava
7.5	Donja glava
7.6	Prirubnica
7.7	Distancer
7.8	Nosač užnice
7.9	Priključak drenažnog voda
7.10	Priključak tlačnog voda
7.11	Bočni nosač užnice

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
RM	kgm	Moment ispravljanja
$m$	kg	Masa
GZ	m	Poluga ispravljanja
$a$	m	Udaljenost od težišta bulba do okretišta
$b$	m	Udaljenost od okretišta do vrha glave; Širina ležaja
$m_{bulba}$	kg	Masa bulba
$F_b$	kN	Maksimalna sila bulba
$F_{gl}$	kN	Sila na glavi zakretne kobilice
$F_O$	kN	Sila u okretištu zakretne kobilice
$F_{cil}$	kN	Nominalna sila u hidrauličkom cilindru
$\Delta L$	m	Promjena duljine užeta od vrha glave do užnice
$h_{min}$	mm	Potrebni hod hidrauličkog cilindra
$h$	mm	Hod hidrauličkog cilindra
$p_{max}$	bar	Najveći radni tlak hidrauličkog sustava; Najveći radni tlak zupčaste pumpe
$p$	bar; Mpa	Tlak u hidrauličkom cilindru; Tlak u ležaju
D	mm	Unutarnji promjer hidrauličkog cilindra; Promjer užnica
t	mm	Debljina stijenke cijevi
$\sigma_t$	Mpa	Naprezanje cijevi hidrauličkog cilindra u tangencijalnom pravcu; Tlačno naprezanje
$\sigma_r$	Mpa	Naprezanje cijevi hidrauličkog cilindra u radijalnom smjeru
$\sigma_l$	Mpa	Naprezanje cijevi hidrauličkog cilindra u uzdužnom smjeru
$\sigma_{ekv}$	Mpa	Ekvivalentno naprezanje cijevi hidrauličkog cilindra
$i$	mm	Radijus tromosti
H	mm	Duljina klipnjače
$R_{eH}$	Mpa	Granica plastičnosti
$d$	mm; cm	Promjer klipnjače; Promjer hidrauličkih cjevovoda
$F_k$	N	Kritična sila izvijanja po Euler-u
E	Gpa	Modul elastičnosti
$R_{p02}$	MPa	Konvencionalna granica tečenja
I	mm <sup>4</sup>	Aksijalni moment tromosti poprečnog presjeka klipnjače
$l_k$	mm	Duljina izvijanja
F	kN	Nominalna sila u užetu
$d_u$	mm	Promjer užeta
MBL	kN	Minimalna prekidna sila (Minimum Breaking Load)
$F_l$	kN	Sila u ležaju užnice

---

$p_{\text{dop}}$	MPa	Najveći dopušteni dinamički tlak u ležaju
$Q$	l/s	Protok hidrauličkog ulja
$n$	o/min	Brzina vrtnje
$q_t$	cm <sup>3</sup> /okr	Teoretska specifična zapremnina pumpe
$q$	cm <sup>3</sup> /okr	Specifična zapremnina pumpe
$P$	W	Snaga elektromotora
$M_{\text{max}}$	Nm	Potreban najveći moment motora
$Q_{\text{max}}$	l/min	Najveći protok hidrauličkog ulja
$v$	m/s	Brzina strujanja kroz cjevovod

## SAŽETAK

Ovim radom predlaže se optimalno rješenje sustava zakretanja kobilice za jedrilicu duljine 40 stopa. Do danas je osmišljen niz različitih rješenja, od sustava zakretanja kobilice konopima i užnicama, hidrauličkim cilindrima, mehaničkim aktuatorima, sve do neuobičajenih rješenja poput zakretanja kobilice pomicanjem po tračnici na vanjskom obodu broda ili pomoću zupčanika s unutrašnjim ozubljenjem. Sustavi su u praksi pokazali vrlo različit potencijal i neki su, poput posljednja dva, izvedeni samo jedanput, u neuspjelim pokušajima konstruiranja „bržeg broda“.

Kao optimalno rješenje za jedrilicu duljine 40 stopa zasad se nameće sustav zakretanja kobilice pomoću dva jednoradna hidraulička cilindra i užeta, kakav je ugrađen na regatnoj jedrilici *Full Pelt*.

S obzirom na to da su hidraulički i konstrukcijski nacrti, kao i plan održavanja sustava ovog broda nedostupni ili nepostojeći, imajući u vidu učinkovitost koju je sustav pokazao u praksi, na regatama, višestruko je korisno detaljno razmotriti i eventualno unaprijediti ovaj sustav.

Radom se predlaže koncept hidrauličkog sustava uz proračun komponenti, konstrukcija i proračun mehanizma za zakretanje kobilice, sve popraćeno nacrtima, te prijedlogom održavanja.

Iako su složeni hidraulički sustavi stekli široku primjenu u gotovo svim područjima, kod jedrilica to još uvijek nije slučaj. Problem predstavlja još uvijek skupa izvedba (takvi sustavi su ekonomski neisplativi na manjim jedrilicama), te sigurnost, odnosno osjetljivost konstrukcije. Sustav zakretanja kobilice ideja je koja ima izrazit potencijal, ako je pravilno izvedena, postati dijelom standardne opreme regatnih jedrilica. Bolje razumijevanje sustava i pravilno proračunavanje komponenata zasigurno bi pridonijelo široj upotrebi takvih sustava.

Ključne riječi: hidraulički sustavi, jedrilice, sustavi zakretanja kobilice, zakretna kobolica

## SUMMARY

The aim of this MA thesis is to suggest the optimal solution of canting keel system for 40 ft long sailboat. So far, a number of various solutions have been developed, from canting keel systems using rope and sheaves, hydraulic cylinders or mechanical actuators, to unusual solutions such as keel canting by moving it across a rail on the outer rim of the sailboat or internal gear wheels. The systems are proven to have different potentials and some of them, the last two in particular, have only been tested once, with unsuccessful attempts at constructing a „faster sailboat“.

The optimal system for a 40 ft sailboat has so far been using the single acting hydraulic cylinder canting keel system with synthetic rope, such as the one used on the Full Pelt racing yacht.

Considering the unavailability of the ship's hydraulic and construction schemes and the maintenance plan, as well as the efficiency it has shown in yacht races, it would be useful to analyze and possibly upgrade this system.

This thesis will suggest a concept of a hydraulic system using component, construction and keel canting system calculations, followed by schemes, as well as a maintenance suggestion. Even though complex hydraulic systems have a wide range of use, sailboats are still to fully utilize the concept. The problem is still the price of installation (such a system is not economically viable on smaller sailboats), the safety, or rather, sensitivity of the construction. The keel canting system is an idea with considerable potential, if done right, can become part of a racing yacht's standard equipment. A better understanding of the system and a correct calculation of its components would definitely contribute to its wider use.

Key words: canting keel, canting keel systems, hydraulic systems, sailboats

## 1. Uvod

Pojava brodova sa zakretnom kobilicom jedan je od većih pomaka u dizajnu jedrilica. Od samih početaka utrkivanja jedrilicama, posade su bile svjesne prednosti koju dobivaju povećanjem stabiliteta broda tj. povećavanjem momenta ispravljanja jedrilice. Zahvaljujući mogućnosti jedrenja s većom silom vjetera u jedrima, postižu se veće brzine. Povećanje momenta uobičajeno se postiže „vješanjem“ posade i slaganjem opreme na strani suprotnoj od nagiba broda. Sljedeći korak u povećanju momenta ispravljanja je korištenje spremnika s vodom, balasta, koji se pune i prazne ovisno o nagibu broda. Ovaj princip dobar je za jedrenje uz vjetar, ali ne i za jedrenje niz vjetar, zbog povećanja ukupne mase broda. Razvojem zakretnih kobilica nastoji se riješiti ovaj problem i poboljšati performanse jedrilica.

Zakretna kobilica omogućava prebacivanje težišta mase same kobilice, na takav način da bez dodatnog povećavanja mase broda, bude povećan moment ispravljanja. Tehnologija zakretne kobilice nije posve nova, ali još uvijek nije u potpunosti komercijalizirana. Tomu su ključni faktori problem cijene, pouzdanosti i složenosti izvedbe. U teoriji, cilj je ostvarenje velikih poboljšanja u performansama broda zamjenom fiksne kobilice zakretnom. U praksi nije moguće na bilo kojem brodu izvesti zamjenu fiksne kobilice zakretnom, jer bi istovremeno zbog smanjenja mase za koju je brod dizajniran bila izmijenjena vodena linija broda i time narušene karakteristike broda. Zakretna kobilica mora biti unaprijed projektirana za određeni tip broda. Ugradnjom zakretne kobilice, bio bi ostvaren jednak ili veći maksimalni moment ispravljanja u odnosu na brod s fiksnom kobilicom koji ima jednaku površinu jedara (pod uvjetom da konstrukcija jarbola i broda mogu podnijeti takvo povećanje), dok bi se istovremeno smanjila ukupna masa broda zbog uštede na masi kobilice. Ugradnjom zakretne kobilice moguće je smanjiti i moment ispravljanja, odnosno stabilitet broda u odnosu na fiksnu kobilicu, što je poželjno u određenim uvjetima jedrenja.

### 1.1. Stabilitet broda

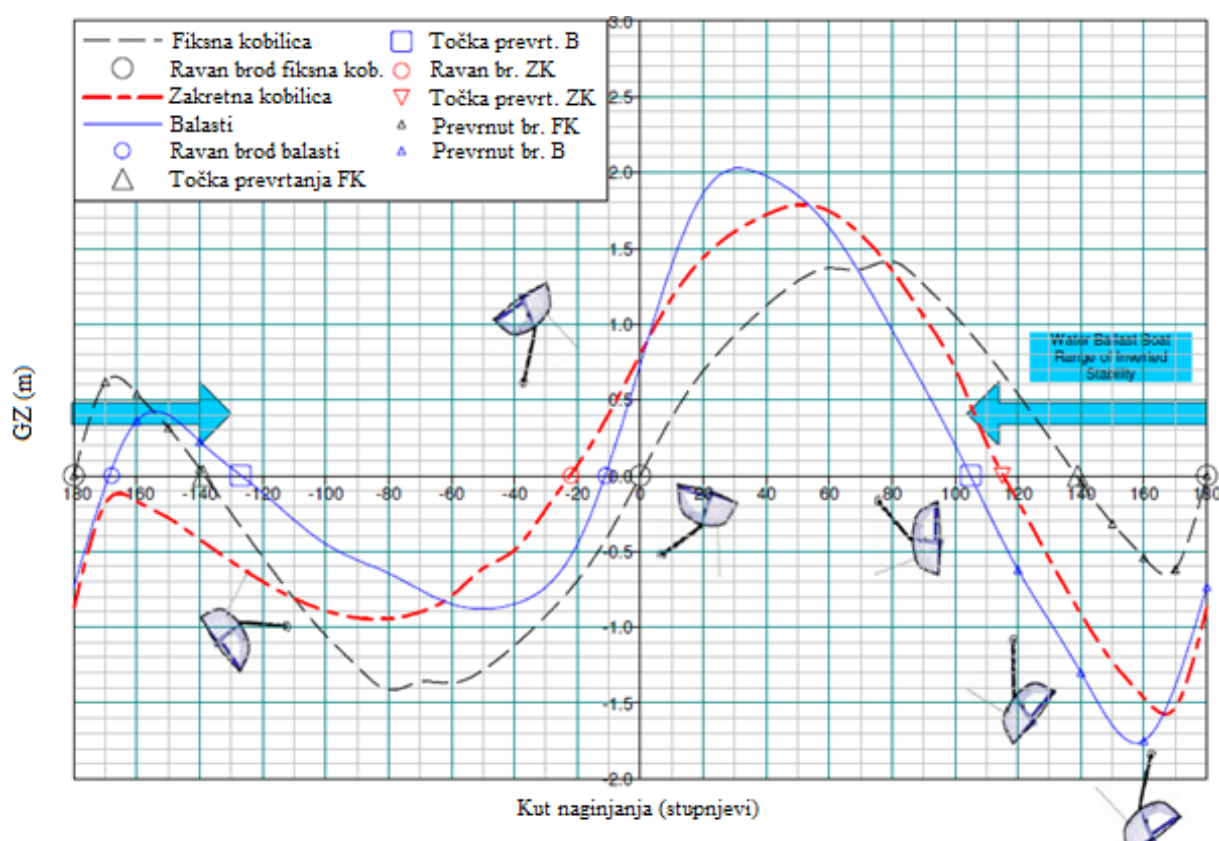
Stabilitet je svojstvo broda da se protivi silama koje ga nastoje nagnuti i da se vraća u ravnotežno stanje kada dođe do prekida djelovanja sila. Stabilitet broda ovisan je o silama koje djeluju na brod i momentu ispravljanja. Moment ispravljanja kod fiksne kobilice jednak je pri jednakim nagibima broda, dok je pri korištenju balastnih spremnika i zakretnih kobilica promjenjiv ovisno o masi mora u balastnim spremnicima, odnosno kutu zakreta kobilice [1].

Moment ispravljanja (RM) broda prikazuje se sljedećom jednadžbom: (1)

$$\text{Moment ispravljanja (kgm)} = \text{masa ispravljanja (kg)} \times \text{poluga ispravljanja GZ (m)} \quad (1)$$

Krivulje na Slici 1 [Slika 1] prikazuju svojstva tri različita tipa stabiliziranja jedrilice:

- Jedrilica s fiksnom kobilicom nema moment ispravljanja pri nagibu broda od 0°, maksimum momenta ispravljanja je pri nagibu broda od približno 80°, što je izvan normalnog raspona nagiba koji iznosi 0°-35°
- Jedrilica s balastnim spremnicima (balastni spremnik maksimalno napunjen), na koju ne djeluju vanjske sile, ima nagib broda od približno 10°
- Jedrilica sa zakretnom kobilicom ima veliki nagib broda uslijed maksimalnog zakreta kobilice bez djelovanja vanjskih sila

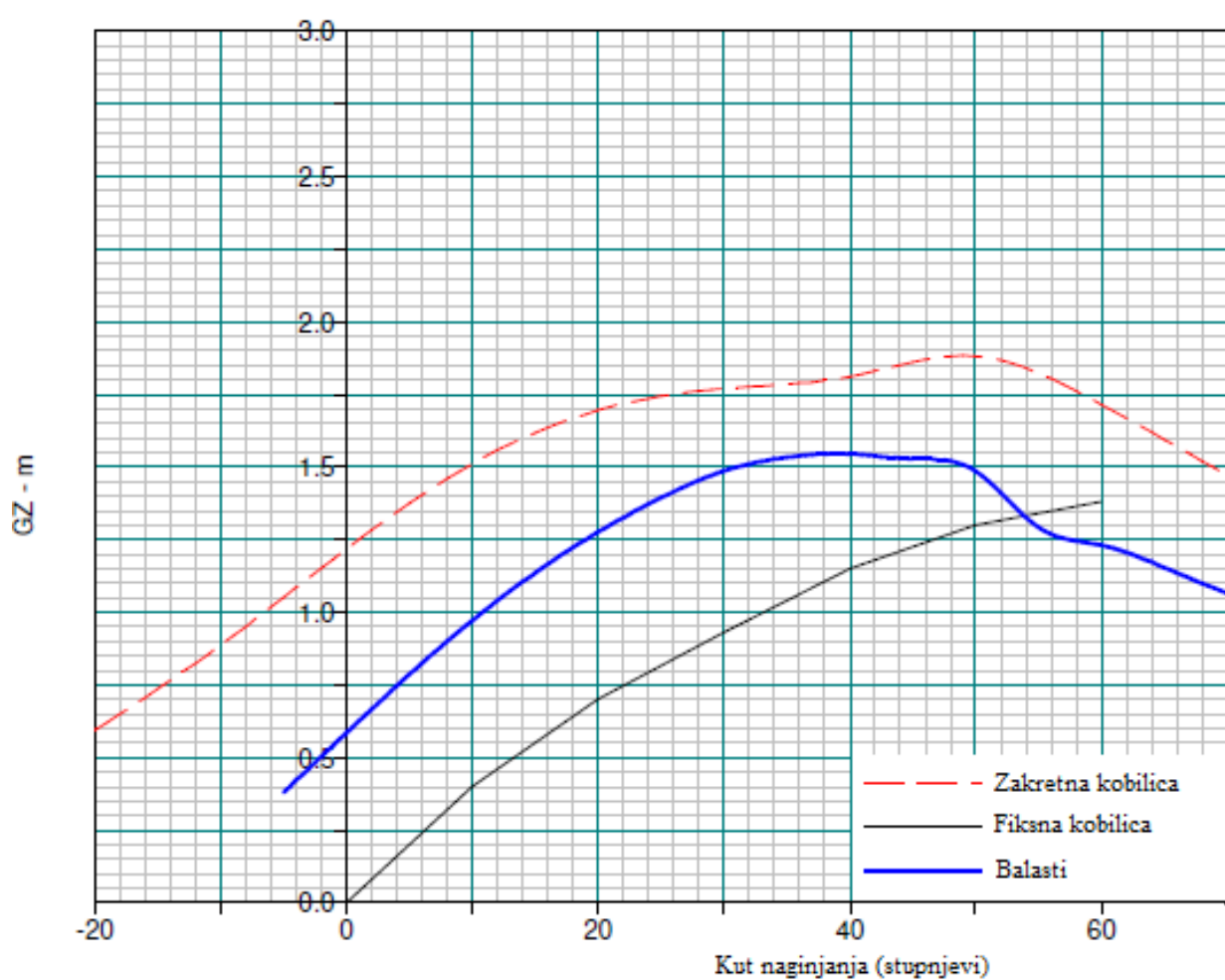


**Slika 1. Različiti tipovi stabiliziranja jedrilice [1]**

Pomoću podataka iz Tablice 1 [Tablica 1], na Slici 2 [Slika 2] prikazane su krivulje momenta ispravljanja za tri tipa stabiliziranja jedrilice. Sva tri tipa odnose se na jedrilice jednake površinom jedara i duljinom broda, kod kojih se razlikuje isključivo način stabiliziranja broda. Ove krivulje bitne su jer pokazuju značajne razlike u performansama koje je moguće postići različitim načinima stabiliziranja jedrilice [1].

**Tablica 1. Usporedba tri tipa broda s jednakim momentom ispravljanja pri optimalnom nagibu broda [1]**

Tip broda	GZ s kutom nagnjanja 20° (m)	Masa broda (kg)	Moment ispravljanja (kgm)
Fiksna kobilica	0.7	10000	7000
Vodeni balasti	1.27	5500	7000
Zakretna kobilica	1.7	4100	7000

**Slika 2. Krivulje tri tipa broda u ovisnosti ispravljačke poluge i kuta nagiba [1]**



## 2. Sustavi zakretanja kobilice jedrilica

Sustavi zakretanja kobilica sustavno evoluiraju i još se uvijek istražuju optimalni načini njihove izvedbe. Glavni je problem postići pouzdanost sustava, odnosno osigurati njegovu jednostavnost. Prve izvedbe zakretnih kobilica imale su zakretanje riješeno pomoću konopa i užnica s obje strane glave kobilice, te bi se s pritezanjem konopa ostvarivao nagib kobilice. U novije vrijeme koriste se hidraulični cilindri [2] i vijčani aktuatori [3]. Također postoje i novi prototipi koji zakreću kobilicu po tračnicama koje se nalaze na obodu dna broda. Za pogone sustava koriste se ljudska snaga ili hidrauličke pumpe, električki pokretane dizelskim generatorima ili baterijama.

### 2.1. Zakretanje kobilice konopima i užnicama ljudskom snagom

Teoretski vrlo jednostavno i jeftino rješenje, u praksi se pokazalo kao izrazito problematično. Sustav čine konopi, užnice i vitla u regularnoj brodskoj izvedbi ili pogonjeni preko grindera [Slika 3].



Slika 3. Grinder i vitlo [4]

Iako je početna investicija relativno jeftina, odabir ovog sustava za sobom povlači velike rizike. Problemi nastaju prilikom manevara, naročito uz vjetar. Izvedeci manevar jedreći uz vjetar, pri čemu je potrebno zarotirati kobilicu iz jednog krajnjeg položaja u drugi, popušta se konop strane koja drži kobilicu, a konop s druge strane se zateže te on preuzima silu [Slika 4] [Slika 5]. Problem je u činjenici da bi takva operacija trajala iznimno dugo (3 min), kada bi kobilica bila prebacivana kontroliranim puštanjem i natezanjem druge strane. Tijekom

manevra nije moguće optimalno upravljati brodom jer se uteg nalazi na krivoj strani, dok je sila vjetrova konstantno u jedrima, što može rezultirati prevrtanjem broda. Posade ovaj problem rješavaju tako da kreću s kontroliranim popuštanjem konopa koji drži kobilicu i prije manevra, dok konop s druge strane povlače bez vitla, isključivo ljudskom silom, sprječavajući petljanje konopa. Kada dođe vrijeme samog manevra naglim popuštanjem konopa koji drži kobilicu omogućuju prijelaz kobilice na drugu stranu i prije završetka manevra nakon čega se kobilica podigne u maksimalni položaj preko vitla. Problem ove tehnike je moguće zapetljanje konopa suprotne strane kod naglog, nekontroliranog popuštanja konopa. Zapetljanje konopa može rezultirati havarijom. Ako brod s ovakvim sustavom zakretanja kobilice jedri regate koje zahtijevaju više manevara u relativno kratkom vremenu, gotovo sigurno će doći do problema. Osim već spomenutih rizika zapetljanja u manevrima, moguća su zapetljanja i prilikom unošenja i iznošenja jedara jer ovaj sustav zahtjeva visoku polugu iznad točke zakretanja kobilice, čime se blokira prostor unutar broda. Još jedan nedostatak ovog sustava je povećana potreba za članovima posade. Za upravljanje ovakvim sustavom, s konopima i užnicama, potrebna su dodatna dva člana posade, dok za upravljanje hidrauličkim sustavom nisu.



**Slika 4.** Sustav zakretanja kobilice konopima i užnicama, brod *Cometa*



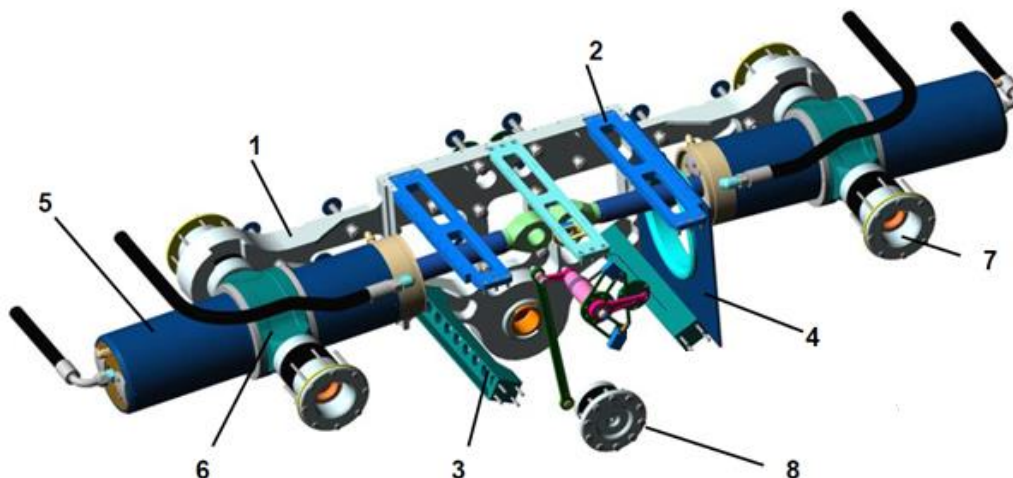
**Slika 5. Osovina zakretne kobilice, brod *Cometa***

## **2.2. Zakretanje kobilice hidrauličkim cilindrima**

Ovaj tip sustava konstantno je unaprijeđivan, ovisno o karakteristikama (jedan ili dva cilindra) i dodatnim mogućnostima (sustav za zakretanje i dizanje kobilice) [2]. Korištenjem ovog sustava osigurana je sigurnost zakretanja prilikom manevriranja. Nestao je faktor umora posade te je znatno smanjeno vrijeme zakretanja i do 25 puta. Ovim sustavom osigurana je mogućnost izvođenja velikog broja manevara u kratkom vremenu uz optimalne performanse. Može se govoriti i o uštedi na masi jer u odnosu na prethodni sustav, eliminirana su dva člana posade.

Najsigurniji sustav bio bi onaj s dva dvoradna cilindra: u slučaju zatajenja jednog cilindra, sustav može nastaviti s radom koristeći samo drugi cilindar. Na sljedećoj slici [Slika 6] objašnjena je struktura jednog sustava s dvoradnim cilindrima koji su pozicionirani u aluminijskoj konstrukciji. Aluminijska poprečna struktura (1) dizajnirana je da izdržava naprezanja s cilindara (5) i da na brodsku strukturu prenosi samo moment ispravljanja kroz ležajeve (7 i 8), koje se nastoji pozicionirati međusobno najudaljenije, kako bi sile bile smanjene na minimum. Uzdužne grede (2 i 3) primarno služe za sprječavanje puknuća konstrukcije u slučaju udara kobilice u neko mirujuće tijelo (velika riba, brodski kontejner,

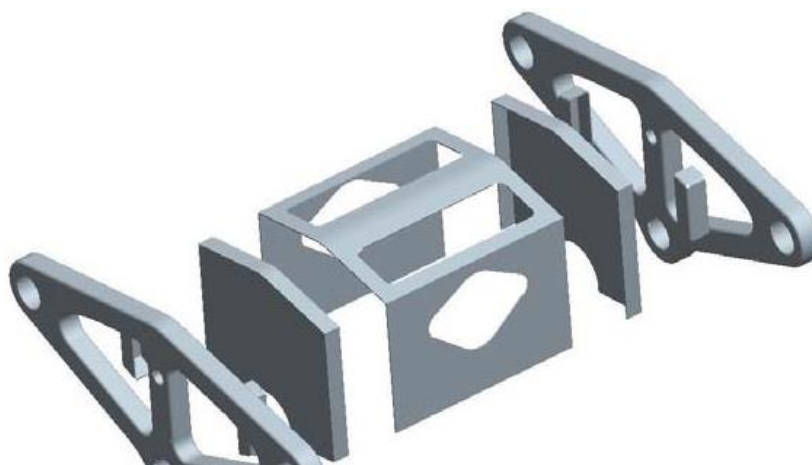
drvena greda) ili nasukavanja. Ležajevi cilindara i osovine kobilice su samopodešavajući, kako bi bila osigurana minimalna odstupanja tijekom jedrenja.



**Slika 6. Sustav zakretanja kobilice dvoradnim hidrauličkim cilindrima [2]**

Cilindri su izrađeni iz 7075 Al slitine, Titana 6Al4V, 17-4-PH H900 nehrđajućeg čelika, klipovi i klipnjače iz 17-4-PH, Nitronic 50 SS i Titana 6Al4V [2]. Sustav je vodonepropusan: centralni dio (dio u kojemu se pomiče glava kobilice) je potopljen, cilindri rade u suhom području jer brtva u uzdužnoj ploči konstrukcije (4) odvaja centralni dio. Poklopac s otvorima za inspekciju brtvi gornju plohu.

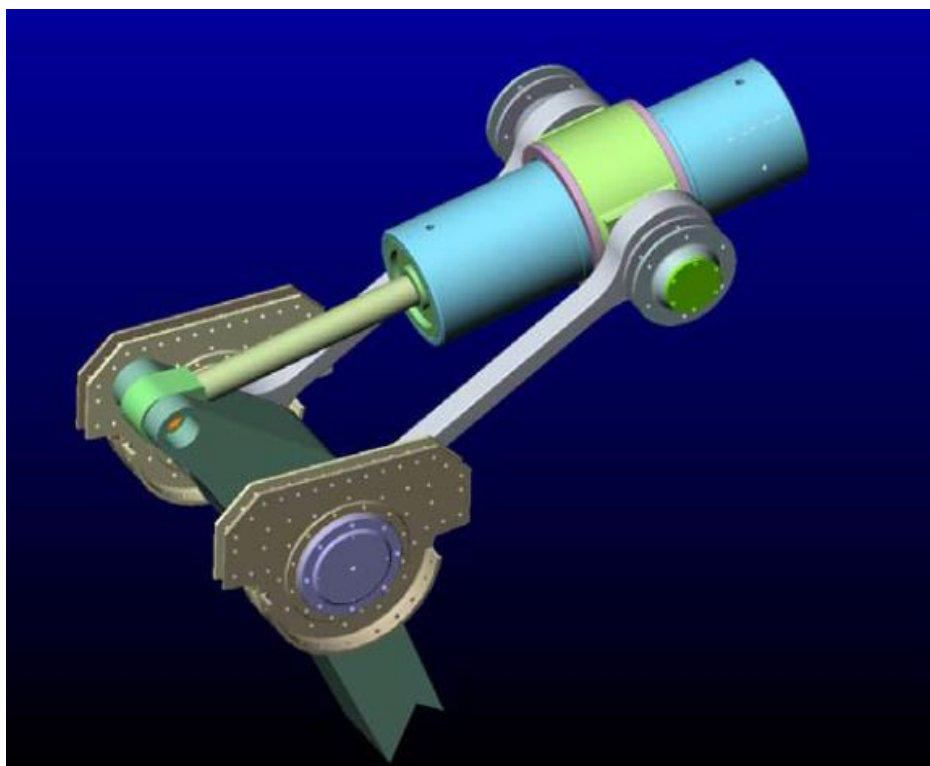
Novije izvedbe sličnih sustava najčešće koriste konstrukciju za montažu izrađenu od istih materijala kao i sam brod (stakloplastika, karbon) čime se postiže ušteda na težini. Koncept ostaje isti: dva glavna dijela „A“ oblika na koje su pričvršćena dva ležaja osovine kobilice i četiri ležaja oslonaca cilindara. Ovaj koncept i dalje je pogodan za instalaciju i servisiranje, ali je postignuta ušteda na težini sustava [Slika 7].



**Slika 7. Kompozitna konstrukcija sustava [2]**



Sustav s jednim dvoradnim cilindrom [Slika 8] omogućuje veće nagibe kobilice. Skošanjem glave kobilice osiguravamo prostor za hod cilindra. I u ovoj konfiguraciji opterećenje s ležajeva zadržava se u konstrukciji sustava te se na brod prenosi samo moment ispravljanja.



**Slika 8. Sustav zakretanja kobilice jednim dvoradnim cilindrom [2]**

Također postoji i izvedba s jednoradnim cilindrima koja će biti detaljno razrađena u sljedećim poglavljima.

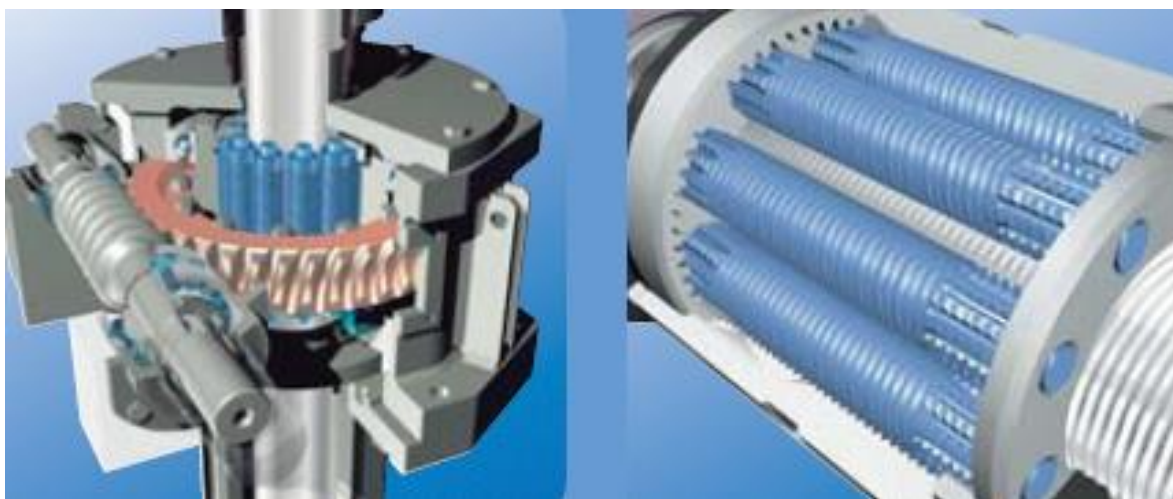
### **2.3. Zakretanje kobilice mehaničkim aktuatorima [Slika 9]**

Industrijski trend zamjene hidraulike s ciljem postizanja čistije, sigurnije i energetski učinkovitije pobude u zadnje vrijeme sve više napreduje, a takav je slučaj i kod zakretnih kobilica. Razvijen je sustav zakretne kobilice koji funkcionira pomoću planetarnih vijaka [Slika 10]. Ovaj sustav odlikuje ušteda na težini u odnosu na sustave s hidrauličkim cilindrima. Osim što osigurava uštedu na težini, njegov glavni napredak je u sigurnosti, jer sustav u slučaju havarije može biti upravljan ljudskom snagom i bez hidraulike [3]. Ovaj sustav pogodan je za natjecanja u duljoj navigacijskoj plovidbi, ali ne i za natjecanja jedrenja oko oznaka, kod kojih je prisutno mnogo uzastopnih manevara. Problem je u sporosti zakretanja kobilice ovim sustavom u odnosu na zakretanje hidraulikom pa se stvaraju gubitci prilikom manevara koji se ne mogu nadoknaditi uštedom od 20% na masi sustava. Sustav može podnijeti dinamičku silu do 200 tona, a statičku do 500 tona. Područje snage ovisi od pogona sustava koji može biti električni ili hidraulički. Električni pogon je u pravilu 24 V koji

ima limit na 20 kW [3]. Veća snaga zahtjeva veću voltažu ili hidraulički motor pokretan dizelskim generatorom. Električni pogon ima najveći potencijal za uštedu na težini sustava zakretanja.



Slika 9. Mehanički aktuator [3]



Slika 10. Planetarni vijci [3]

#### 2.4. Zakretanje kobilice pomicanjem kobilice po tračnici na obodu vanjske plohe broda

Ovaj koncept zasad nije šire primijenjen, odnosno provediv je tek na jednom tipu broda naziva *Q*, ali je poradi inovativnosti sustav zavrijedio usputno spominjanje. Sustav je slabo poznat. Zna se da radi na dizelski generator, izrazito je kompliciran u konstrukcijskoj izvedbi, te konstrukcijski ograničava oblik dna broda zbog potrebe klizanja kobilice po njegovom obodu [Slika 11] [5]. Dodatan problem predstavlja žlijeb tračnice kojega je potrebno zatvarati na mjestima na kojima se kobilica trenutno ne nalazi, kako bi fluid konstantno strujao trupom broda. Ono što ovaj koncept može postići, a prethodni nisu, jest izrazito veliki nagib kobilice, čak do  $80^\circ$  u odnosu na centralni položaj, što omogućuje da pri normalnom jedrenju s nagibom od  $20^\circ$  kobilica i bulb izađu iz mora čime se smanjuje otpor pri kretanju broda [Slika 12].



**Slika 11. Tračnica za zakretanje [5]**

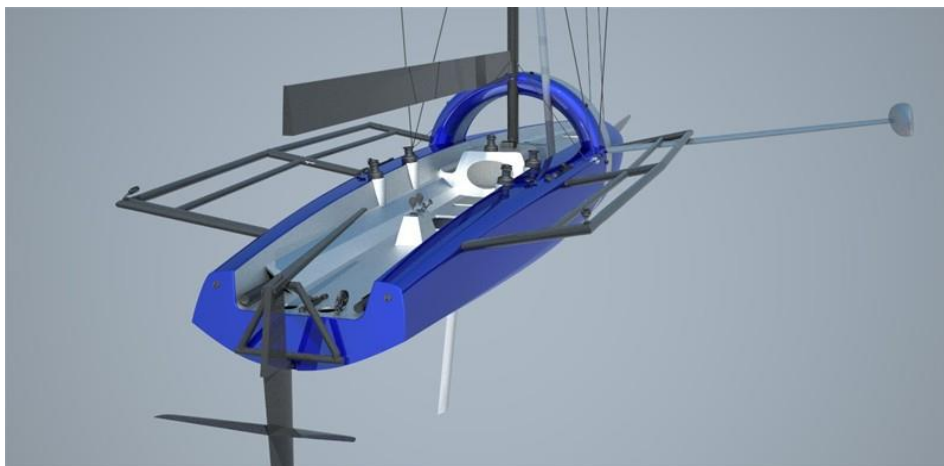


**Slika 12. Kobilica u položaju iznad mora [5]**

## **2.5. Zakretanje kobilice pomoću zupčanika s unutrašnjim ozubljenjem**

I ovaj je sustav izveden samo jednom, ali je još neobičniji od prethodnog [Slika 13]. Sustavom je opremljen talijanski brod *Stravaganza* te je nakon ugradnje prošlo čak tri godine dok sustav nije konačno proradio. Brod nije ostvario značajne rezultate na natjecanjima. Možda je jedan od razloga izrazito sporo zakretanje kobilice, te dno broda ograničeno neuobičajenim oblikom valjka koji nije idealan za postizanje većih brzina. Paluba je izrazito problematična jer je zbog zupčanika s unutrašnjim ozubljenjem koji se proteže čitavom širinom broda otežano kretanje posade njenom površinom [Slika 14]. Kao i prethodni i ovaj

sustav omogućuje izranjanje kobilice i bulba iz mora. O njemu nije poznato mnogo više podataka.



**Slika 13. Kompjuterski model broda *Stravaganza* [5]**



**Slika 14. Brod *Stravaganza* [5]**



### 3. Odabir koncepta zakretanja kobilice za jedrilicu duljine 40 stopa

Sustav užetom i užnicama pokretan ljudskom snagom nije pouzdan i kao sustav je zastario. Njegovom upotrebom dolazi do previše popratnih problema, uključujući zapetljanje konopa i blokadu potpalubnog prostora. Najveći problem ovog sustava je kompliciranost manevara. Brod duljine 40 stopa trebao bi biti pogodan prvenstveno za jedrenje u mirnijim morima, jedreći po kursu zadanom plutajućim oznakama, što zahtjeva veliki broj manevara. Takvi manevri trajali bi predugo i umorili posadu. Osim problema koji nastaju kod manevara tu je i problem broja članova posade, koji se uobičajeno za tu duljinu broda kreće oko 10 ljudi, a ovim sustavom stvara se potreba za dodatna dva člana, što je gotovo neizvedivo za brod te duljine.

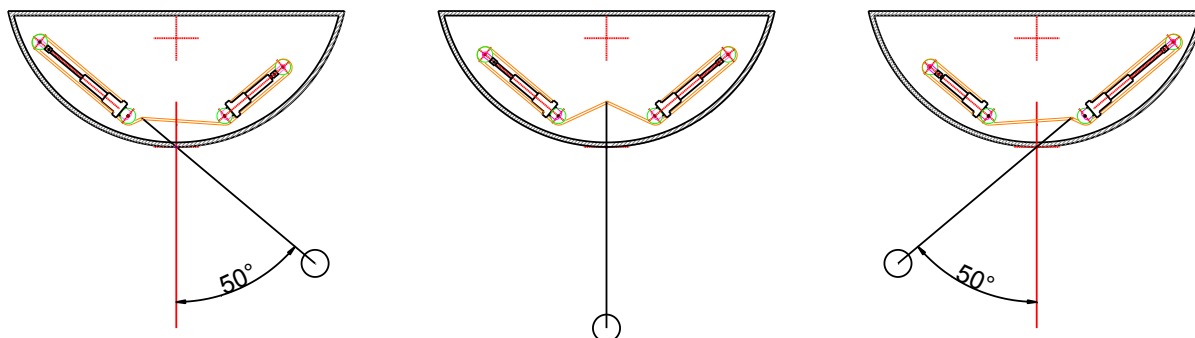
Zakretanje kobilice hidrauličkim cilindrima optimalno je rješenje za brod duljine 40 stopa. Jedrilici omogućava sigurne i brze manevre, prohodnost potpalubnog dijela, te uštedu na broju ljudi u odnosu na prethodni sustav. Kada bi ovaj sustav bio opremljen s dva dvoradna cilindra, funkcionirao bi bez problema, ali zbog uštede na težini rješenje bi trebalo usmjeriti na nešto drugo. Kao mogućnost pojavljuje se ugradnja jednog dvoradnog cilindra koji bi mogao zakretati kobilicu jedrilice od 40 stopa. Masa kobilice broda te veličine relativno je mala. Negativna strana ovog sustava je njegova relativno velika masa i kompliciranost izrade. Izvedba zahtjeva određene preciznosti u izradi kućišta i njegovoj montaži, što poskupljuje proizvodnju i konačni proizvod [2].

Zakretanje mehaničkim aktuatorima sličnih je karakteristika kao hidrauličko zakretanje. Također je moguća izvedba s jednim ili dva aktuatora. Neke razlike u odnosu na sustav s hidrauličkim cilindrima su ušteda na težini od 20%, ali i dulje vrijeme zakreta [3]. Zbog relativno dugog perioda zakretanja niti ovaj sustav ne predstavlja idealno rješenje.

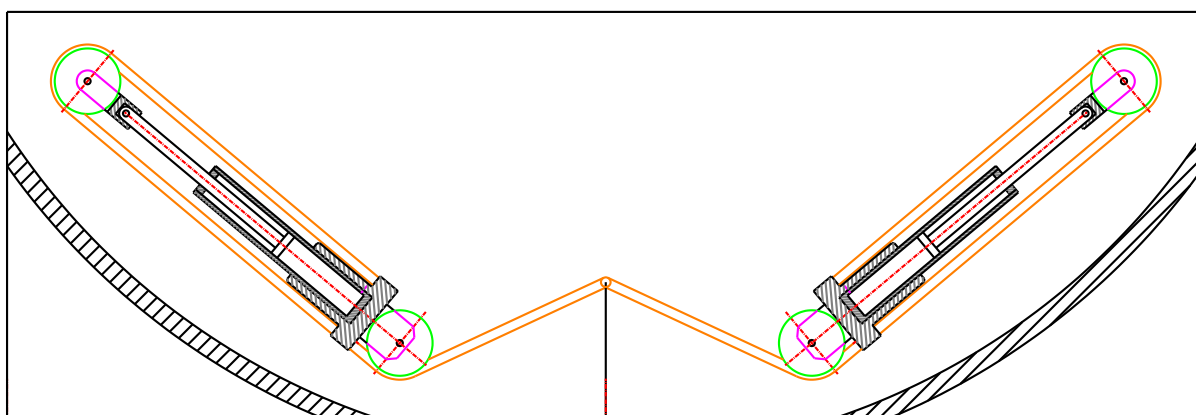
Konceptni sustavi iz prvog poglavlja, sustav zakretanja kobilice pomicanjem po tračnici i sustav zakretanja pomoću zupčanika s unutrašnjim ozubljenjem, nikako nisu rješenje zbog svoje prekompliciranosti, nesigurnosti i visokih troškova izvedbe.

Rješenje koje će biti razvijeno u ovom radu je sustav zakretanja kobilice pomoću dva jednoradna hidraulička cilindra i užeta [Slika 15]. Ovaj sustav, za razliku od sustava s dvoradnim cilindrima ne zahtjeva preciznu izradu jer nije potrebno postavljanje cilindara na zakretne oslonce, odnosno ležajevi koji omogućuju zakretanje cilindara u tom su slučaju nepotrebni. U odnosu na klasični hidraulični sustav omogućuje se kompaktnost, kraće vrijeme

zakreta, veći kutevi nagiba kobilice i ušteda na težini [Slika 16]. Sustav se sastoji od dva hidraulička jednoradna cilindra, četiri užnice, dva sintetička užeta i hidrauličkog postrojenja.



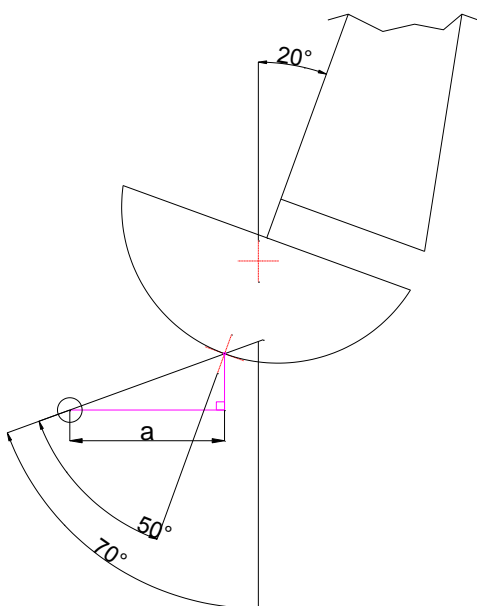
**Slika 15. Prikaz zakretanja kobilice pomoću jednoradnih cilindara i užeta**



**Slika 16. Uvećani prikaz položaja cilindara kada je kobilica u centralnom položaju**

Kompaktnost ovog sustava ostvarena je korištenjem užeta koje je omotano oko cilindra pomoću užnica tako da kada se klip cilindra pomiče, uže zateže kobilicu dvostrukom brzinom. Na ovaj način hod cilindra dvostruko je smanjen u odnosu na sustav zakretanja s dvoradnim cilindrima ili mehaničkim aktuatorima. Standardni kutevi zakretanja kobilice su do  $40^\circ$ , ali su najčešći sustavi s  $30^\circ$  zakreta. Korištenjem sustava s jednoradnim cilindrima i užetima ostvariv je zakret i od  $55^\circ$  u svaku stranu zakretanja. Veći zakret bio bi problematičan zbog velikih otpora hidrodinamičkog strujanja u području spoja kobilice i trupa broda. Ako je optimalni nagib broda za jedrenje uz vjetar  $20^\circ$ - $30^\circ$ , a kobilica je zakrenuta za  $50^\circ$ , preostaje  $10^\circ$ - $20^\circ$  zakreta prije nego li kobilica izroni iz mora. Brod bi imao najveći moment ispravljanja kada bi kobilica stajala paralelno s morem, ali u toj poziciji kobilica se ne bi mirno kretala fluidom zbog velike blizine s površinom mora na kojoj je gibanje fluida uslijed valova nepravilno. Moment ispravljanja mijenja se ovisno o vrijednosti poluge na kojoj djeluje sila mase bulba ( $a$ ) [Slika 17], koja može biti nula ili maksimalna (duljina kobilice od težišta bulba do točke zakreta kobilice). Kod brodova standardnih linija kobilicu nije potrebno zakretati za više od  $50^\circ$ , jer će uslijed nagiba broda od  $20^\circ$  ukupan zakret kobilice iznositi  $70^\circ$ ,

pri čemu je iskorišteno 93% maksimalne vrijednosti poluge na kojoj djeluje sila mase bulba [Slika 17]. Brod *Full Pelt* koji se nalazi u Splitu koristi ovakav sustav zakretanja. Brod ima mogućnost zakretanja kobilice  $55^\circ$  u svaku stranu. Ova jedrilica može imati kut zakretanja veći od  $50^\circ$ , bez da se kobilica približi površini mora, jer oblik trupa ne dozvoljava nagnjanje broda veće od  $20^\circ$  bez uranjanja palube u more, što stvara veliki otpor strujanju. Brod je za svoju duljinu od 36 stopa izrazito širok te ima nisku palubu [Slika 18]. Sustav zakretanja kobilice ovom brodu omogućuje razvijanje brzina i do 30 čvorova. Ovim sustavom, za razliku od sustava s dvoradnim cilindrima, gubimo potrebu za širokom konstrukcijom, te smanjujemo potrebu za brojem ležajeva sustava jer se cilindri uslijed korištenja užeta ne moraju rotirati. Samim smanjenjem dijelova sustava smanjujemo i njegovu masu.



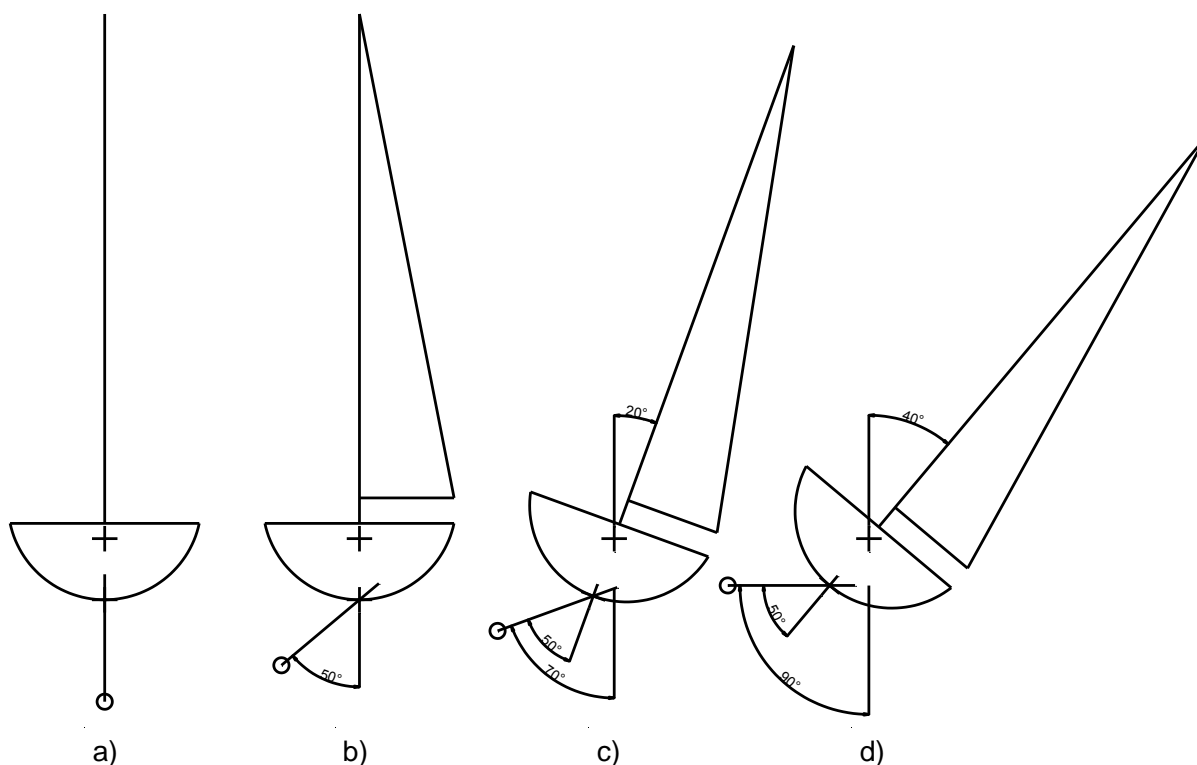
**Slika 17. Prikaz poluge ispravljanja u odnosu na kut zakreta kobilice i broda**



**Slika 18. Brod *Full Pelt* nagnut pomoću zakretne kobilice**

#### 4. Proračun uređaja za zakretanje kobilice

Pri jedrenju broda sa zakretnom kobilicom postoji nekoliko karakterističnih položaja broda i kobilice [Slika 19]. U prvom slučaju (a) brod nije opterećen silom vjetra. Brod i kobilica nisu zakrenuti. U drugom slučaju (b) brod je opterećen silom vjetra u mjeri da je djelovanje vjetra uravnoteženo maksimalno zakrenutom kobilicom ( $50^\circ$ ) pa je zbog toga brod nezakrenut. U trećem slučaju (c) brod je zakrenut za optimalni kut (oko  $20^\circ$ ), pod kojim ima optimalne uvjete za jedrenje uz vjetar, a kobilica je maksimalno zakrenuta. Četvrti, ujedno najnepovoljniji slučaj za sustav koji zakreće kobilicu (d) je onaj u kojemu je brod preopterećen i zakrenut više od optimalne vrijednosti jedrenja uz vjetar ( $40^\circ$ ), a kobilica je zakrenuta maksimalno ( $50^\circ$ ), što je dovodi u vodoravan položaj, odnosno  $90^\circ$ . U ovom položaju sustav koji zakreće kobilicu je najopterećeniji zbog najvećeg okretnog momenta kobilice (najveći krak).



**Slika 19. Prikaz stupnjeva zakreta kobilice i broda**

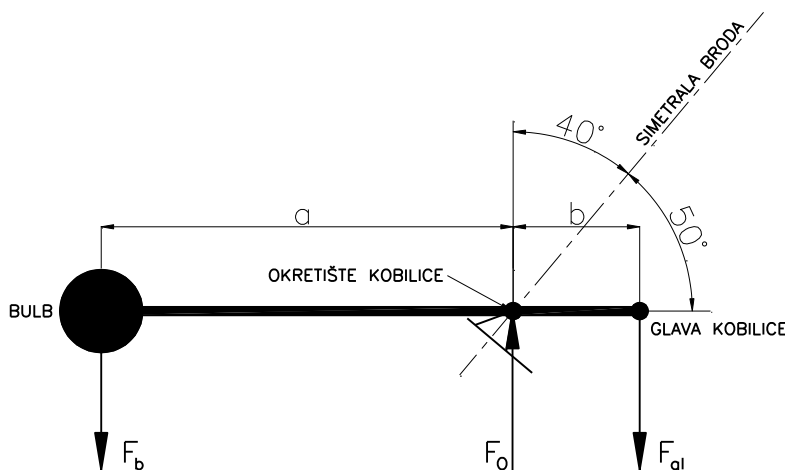
Proračun uređaja za zakretanje kobilice temelji se na literaturi navedenoj u popisu literature pod 6 i 7 [6][7].

Za proračun broda duljine 40 stopa, temeljem iskustva i iz Tablice 1 [Tablica 1] usvojeno je:

- masa bulba:  $m_{\text{bulba}} = 1000 \text{ kg}$
- udaljenost od težišta bulba do okretišta:  $a = 2,0 \text{ m}$
- udaljenost od okretišta do vrha glave:  $b = 0,5 \text{ m}$

#### 4.1. Sile na kobilici

Sile su na kobilici najveće kada je kobilica u vodoravnom položaju [Slika 20], [Slika 21].



**Slika 20. Sile koje djeluju na kobilicu u vodoravnom položaju**

Pretpostavka je da će sila na glavi kobilice koja zakreće kobilicu biti okomita na kobilicu u krajnjem položaju. Uz težinu bulba u zraku  $F_b = 10 \text{ kN}$  sila na glavi zakretne kobilice je:

$$F_{gl} = F_b \frac{a}{b} = 10 \frac{2}{0.5} = 40 \text{ kN},$$

a najveća nominalna sila u okretištu (ležaju) zakretne kobilice je: (2)

$$F_O = F_b + F_{gl} = 50 \text{ kN} \quad (2)$$



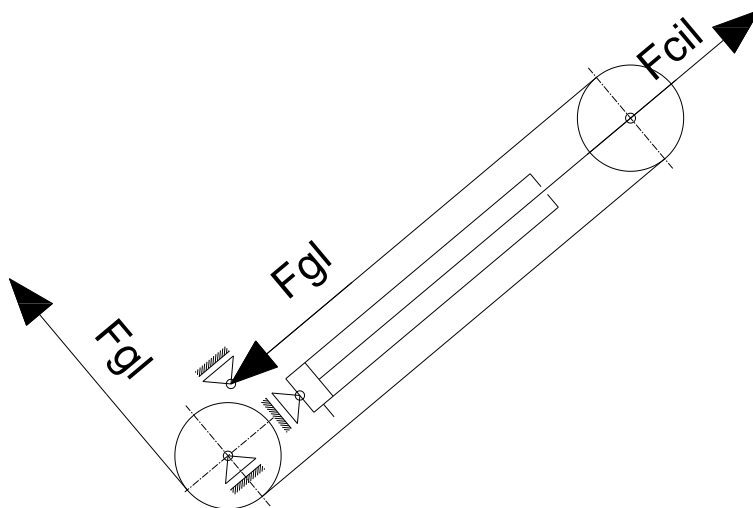
**Slika 21. Najnepovoljniji slučaj za hidraulički sustav zakretanja kobilice, Mini Transat 650 [8]**

Izračunana najveća sila na glavi i u okretištu kobilice je nominalna, a zbog gibanja broda na valovima sile se uvećavaju za dinamički faktor koji ovisi o načinu jedrenja i stanju mora.

## 4.2. Hidraulički cilindar

### 4.2.1. Sile na cilindru

Kobilica se zakreće s dva jednoradna hidraulička cilindra, međusobno povezana užetom preko glave zakretne kobilice [Slika 22]. U cilju smanjenja radnog hoda cilindra na vrhu klipnjače nalazi se užnica oko koje se omotava užje. Na ovaj način potreban hod cilindra smanjuje se na polovinu, ali se istodobno dvostruko povećava sila u cilindru.



Slika 22. Sile koje djeluju na hidraulički cilindar

Nominalna sila na hidrauličkom cilindru je: (3)

$$F_{cil} = 2 \cdot F_{gl} = 80 \text{ kN} \quad (3)$$

### 4.2.2. Potreban hod cilindra

Kobilica se iz neutralnog položaja zakreće za kut  $\alpha = 50^\circ$  u jednu i drugu stranu [Slika 23]. Na slici je prikazana kobilica u neutralnom (srednjem) i dva krajnja položaja.

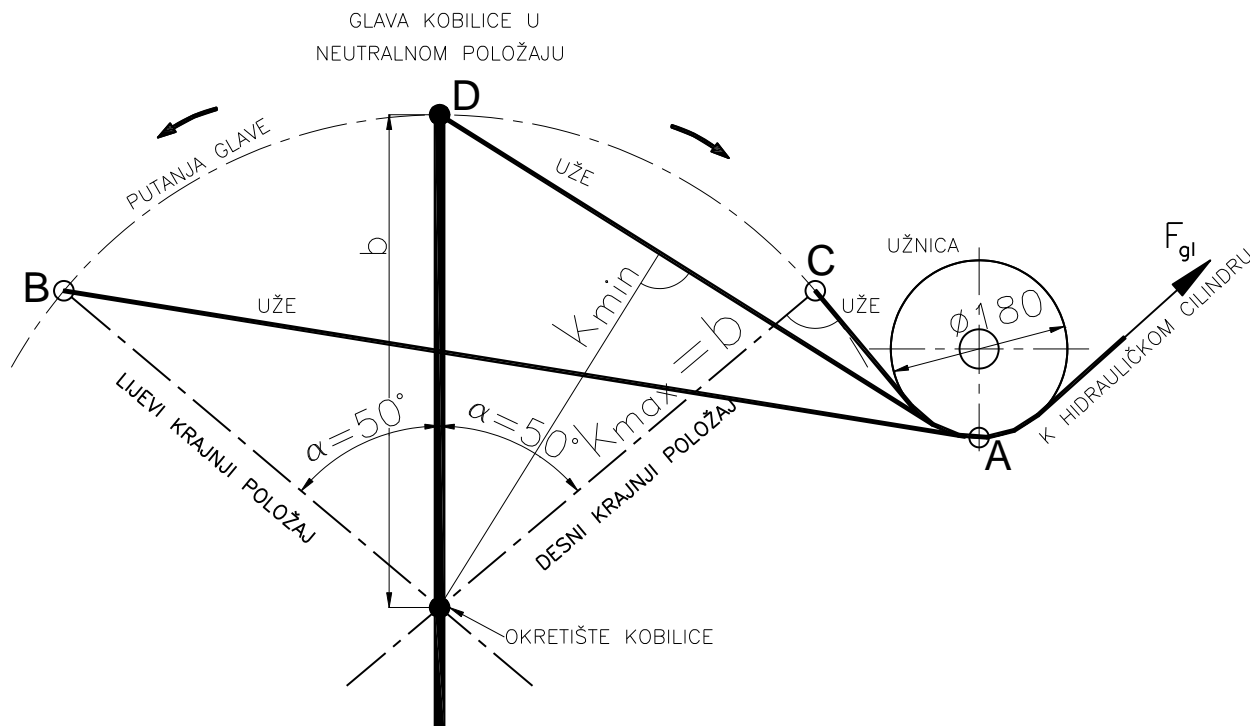
Razlika duljine užeta kada je kobilica u krajnjem lijevom i krajnje desnom položaju je: (4)

$$\Delta L = \overline{AB} - \overline{AC} \quad (4)$$

Duljina  $\Delta L$  ovisi i o položaju užnice prema glavi kobilice, a razumno bi je bilo postaviti u položaj da glava kobilice u krajnjem položaju, točka C, leži na zajedničkoj tangenti putanje glave i kružnice užnice. Na ovaj način se povećavanjem momenta potrebnog za zakretanje glave povećava i krak, što rezultira manjim silama u užetu. Međutim, ovaj zahtjev zavisno od konstrukcije broda, može otežati prostorni smještaj užnica i hidrauličkih cilindara. Najmanji krak je kada je kobilica u neutralnom položaju, a najveći je,  $k_{\max} = b$ , kada je kobilica u krajnjem položaju.

Promjena duljine užeta od vrha glave do užnice koja je postavljena prema Slici 23 [Slika 23]

iznosi:  $\Delta L = \overline{AB} - \overline{AC} = 720 \text{ mm}$ .



**Slika 23. Prikaz zakreta glave kobilice i pomaka užeta**

Potreban hod hidrauličkog cilindra je: (5)

$$h_{\min} = \frac{\Delta L}{2} = \frac{720}{2} = 360 \text{ mm} \quad (5)$$

Radi potrebe regulacije i krajnjih sklopki koje isključuju pogon, hod cilindra mora biti veći od minimalno potrebnog.

Usvaja se hod hidrauličkog cilindra:  $h = 400 \text{ mm}$

### 4.2.3. Promjer hidrauličkog cilindra

### Radni tlak hidrauličkog sustava

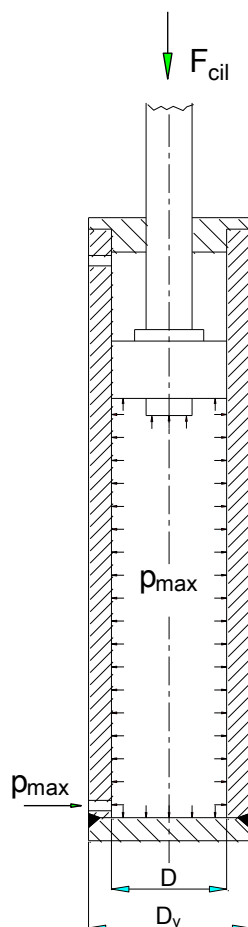
Povećanjem radnog tlaka hidrauličkog sustava smanjuju se dimenzije i masa sustava, ali se zahtijevaju skuplje hidrauličke komponente: pumpe, cilindri, priključci, fleksibilna crijeva, itd.

Optimalnim se ocjenjuje najveći radni tlak za kojeg je moguće primijeniti zupčaste pumpe i pri kojem se mogu koristiti uobičajeni načini spajanja komponenti (standardni Ermeto spoj s usječnim prstenom) [9].

Usvaja se najveći radni tlak hidrauličkog sustava:

$$p_{\max} = 250 \text{ bara}$$

Potreban promjer hidrauličkog cilindra [Slika 24]



**Slika 24. Shema hidrauličkog cilindra**

Tlak u cilindru je:

$$p = \frac{F_{cil}}{A} = \frac{\varphi \cdot F_{cil}}{\frac{D^2 \pi}{4}} = \frac{4 \cdot \varphi \cdot F_{cil}}{D^2 \pi} \leq p_{max}, \text{ odnosno}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{4 \cdot \varphi \cdot F_{cil}}{\pi \cdot p_{max}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.2 \cdot 80 \cdot 10^3}{\pi \cdot 25}} = 69.9 \text{ mm}$$

$\varphi = 1.2$  ; - dinamički koeficijent povećanja opterećenja zbog jedrenja na valovima

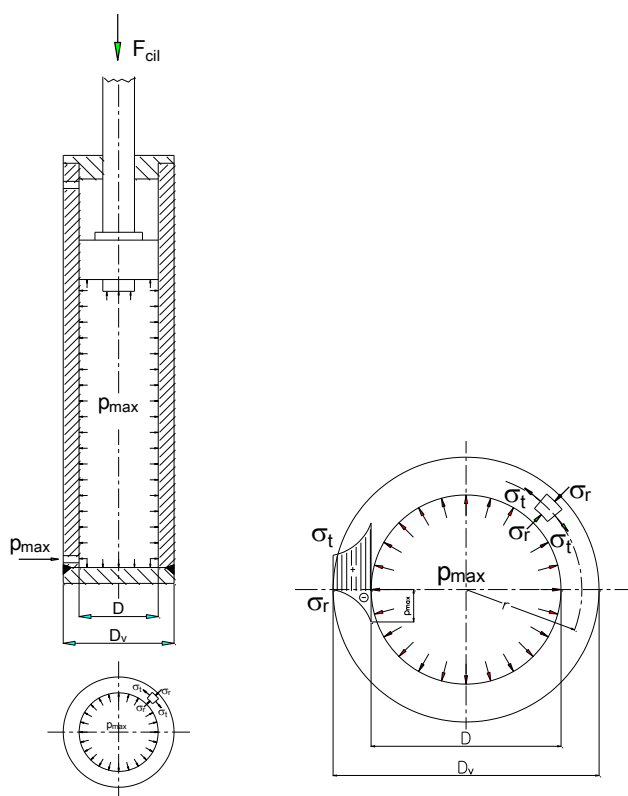
Usvaja se unutarnji promjer cilindra  $D = 70 \text{ mm}$ .

Radi što manje mase odabrat će se relativno tanka cijev.

Za cilindar se odabire standardna cijev, DIN 2448, Ø82/Ø70, debljina stijenke cijevi  $t=6 \text{ mm}$ .



## Naprezanje u cijevi hidrauličkog cilindra [Slika 25]

**Slika 25. Naprezanje u cijevi hidrauličkog cilindra**

Pri izračunavanju naprezanja u cijevi hidrauličkog cilindra zbog velikih relativnih debljina stijenki, cijevi se smatraju za debelostijene i napušta se pretpostavka da je u poprečnom presjeku cijevi naprezanje konstantno. Prihvaćeno je da se cijev može smatrati tankostijenom, ako je debljina stijenke  $t$  manja od desetine srednjeg promjera cijevi. Iako odabrana cijev cilindra Ø82/Ø70 zadovoljava uvjet da bi se mogla smatrati tankostijenom izračunat će se naprezanja u cijevi kao da je debelostijena [10].

U poprečnom presjeku cijevi dva su glavna naprezanja: u tangencijalnom pravcu  $\sigma_t$  i u radijalnom pravcu  $\sigma_r$ . Najveće naprezanje u tangencijalnom i radijalnom pravcu je za točke koje se nalaze na unutarnjoj površini cilindra (na promjeru  $D$ ).

Omjer unutarnjeg i vanjskog promjera cijevi:

$$\delta = \frac{D}{D_v} = \frac{70}{82} = 0.853$$

Najveće naprezanje cijevi u tangencijalnom pravcu u poprečnom presjeku, dovoljno udaljenom od krajeva cilindra je:

$$\sigma_t = p_{max} \frac{1 + \delta^2}{1 - \delta^2} = 25 \frac{1 + 0.853^2}{1 - 0.853^2} = 158.6 \text{ MPa}$$

Ovo naprezanje, smatrajući cijev tankostijenom bi iznosilo:

$$\sigma_t = \frac{D \cdot p_{max}}{2 \cdot t} = \frac{70 \cdot 25}{2 \cdot 6} = 145.8 \text{ Mpa},$$

odnosno, naprezanje izračunano kao da je cijev tankostijena je 8% manje.

Naprezanje u radijalnom smjeru na unutarnjem promjeru jednako je tlaku i iznosi:

$$\sigma_r = -p_{max} = -25 \text{ MPa}$$

Naprezanje u aksijalnom smjeru

Dok je klip cilindra u nekoj točki između dva krajnja položaja, cijev cilindra nije opterećena u uzdužnom pravcu i u cijevi vlada ravninsko stanje naprezanja. Dolaskom klipa u gornji krajnji položaj, pod djelovanjem tlaka  $p_{max}$ , cijev će biti napregnuta i u uzdužnom pravcu, tako da u cijevi vlada prostorno stanje naprezanja.

Naprezanje u uzdužnom pravcu je:

$$\sigma_l = p_{max} \frac{D^2}{D_v^2 - D^2} = 25 \frac{70^2}{82^2 - 70^2} = 67.2 \text{ Mpa}$$

Uzdužno naprezanje  $\sigma_l$  jednako je srednjoj vrijednosti naprezanja u tangencijalnom i radijalnom pravcu.

Ekvivalentno naprezanje u najopterećenijim točkama cijevi računa se po teoriji najvećih posmičnih naprezanja ili za cijevi većih čvrstoća (materijali za poboljšavanje) po HMMH teoriji.

Ekvivalentno naprezanje cijevi po HMMH teoriji (6):

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_l^2 - \sigma_t \cdot \sigma_r - \sigma_t \cdot \sigma_l - \sigma_r \cdot \sigma_l} \quad (6)$$

Nakon uvrštenja i sređivanja dobije se:

$$\sigma_{ekv} = p_{max} \frac{\sqrt{3}}{1-\delta^2} = 25 \frac{\sqrt{3}}{1-0.853^2} = 159 \text{ Mpa}$$

Za materijal cijevi uzet će se materijal DIN X2CrNiN24-4, s granicom plastičnosti  $R_{eh} = 400$

Mpa, pa je sigurnost :

$$s = \frac{R_{eh}}{\sigma_{ekv}} = \frac{400}{159} = 2.52$$

#### 4.2.4. Proračun klipnjače [11]

Odabire se klipnjača promjera  $d = \varnothing 40 \text{ mm}$ .

Naprezanje klipnjače:

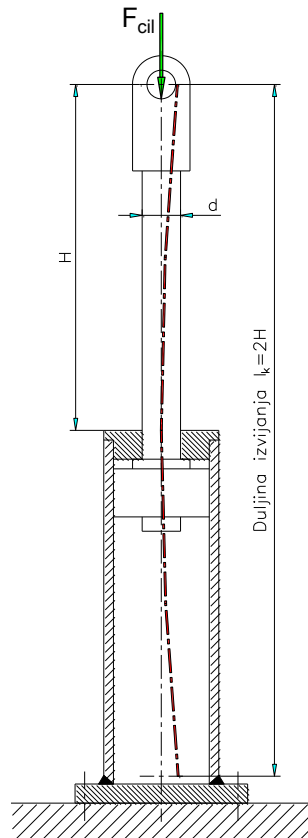
$$\sigma_t = \frac{F_{cil}}{A} = \frac{4 \cdot F_{cil}}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 80 \cdot 10^3}{\pi \cdot 40^2} = 63.7 \text{ MPa}$$

Materijal klipnjače je čelik Ck45 (Č.1530).

Radius tromosti poprečnog presjeka klipnjače je:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{d^4 \cdot \pi}{64} \cdot \frac{4}{d^2 \cdot \pi}} = \frac{d}{4} = \frac{40}{4} = 10 \text{ mm}$$

Hidraulički cilindar učvršćen je na način prikazan na Slici 26 [Slika 26].



**Slika 26. Izvijanje klipnjače hidrauličkog cilindra**

Duljina klipnjače je:

$$H = h + 100 \text{ mm} = 400 + 100 = 500 \text{ mm}$$

Klipnjača se može smatrati upetom na donjem kraju, a slobodnog vrha. Duljina izvijanja  $l_k$  jednaka je dvostrukoj duljini klipnjače  $H$ .

$$l_k = 2 \cdot 500 = 1000 \text{ mm}$$

Vitkost klipnjače je:

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = \frac{1000}{10} = 100$$

Granična vitkost je:

$$\lambda_p = \pi \sqrt{\frac{E}{R_{p02}}} = \pi \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{360 \cdot 10^6}} = 75.8,$$

gdje je:

- modul elastičnosti:  $E = 210 \text{ GPa}$
- konvencionalna granica tečenja  $R_{p02} = 360 \text{ MPa}$

Kako je  $\lambda > \lambda_p$ , kritična sila izvijanja računa se po Euler-u.

Kritična sila izvijanja po Euler-u:

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2}$$

Aksijalni moment tromosti poprečnog presjeka klipnjače:

$$I = \frac{d^4 \cdot \pi}{64} = 13.2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$l_k = 1000 \text{ mm}$$

Kritična sila izvijanja je (7):

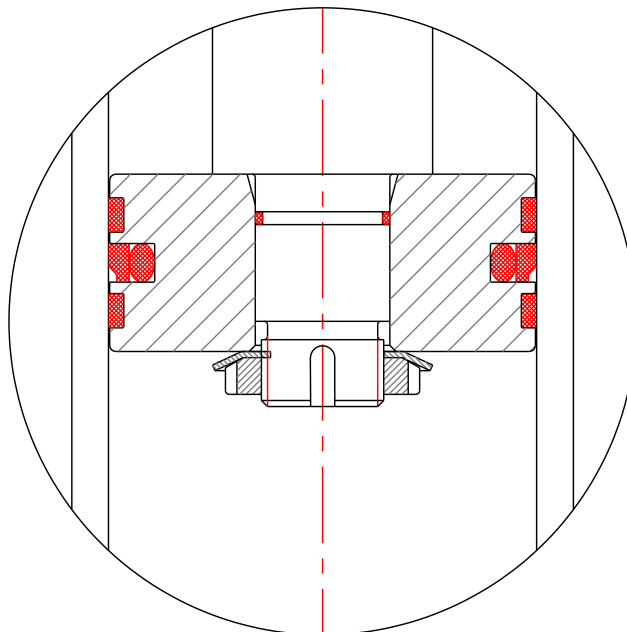
$$F_k = \frac{\pi^2 E I}{l_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 13.2 \cdot 10^4}{1000^2} = 273 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (7)$$

Sigurnost protiv izvijanja [Slika 26]: (8)

$$s = \frac{F_k}{F_{cil}} = \frac{273}{80} = 3.41 > s_{min} = 3 \quad (8)$$

Klipnjača je sigurna obzirom na izvijanje i tlačno naprezanje.

Veza klipa i klipnjače [Slika 27]



**Slika 27. Veza klipa i klipnjače**

Klip promjera  $d = \varnothing 70 \text{ mm}$  se s klipnjačom  $d = \varnothing 40$  povezuje maticom KM4, DIN 981, s navojem M20x1.5. Kako je cilindar jednoradni, ova veza nikad nije opterećena.

Veza glave hidrauličkog cilindra i cijevi hidrauličkog cilindra ostvarit će se zavarivanjem.

#### 4.2.5. Izbor užeta

Glava kobilice će se s hidrauličkim cilindrima povezati užetima. Nominalna sila u užetu je:

$$F = F_{gl} = 40 \text{ kN.}$$

U obzir dolazi čelično uže od nehrđajućeg čelika ili sintetičko uže visoke čvrstoće i elastičnosti. Zbog manje mase i manjih promjera užnica, prednost će se dati sintetičkom užetu.

Izabire se uže promjera  $d_u=16\text{mm}$ , tip: D12 Plus Maxtech, proizvođača Dyneema, s minimalnom prekidnom silom od MBL (Minimum Breaking Load) = 210 kN [12]. Ova prekidna sila ulazi u rang najčvršćih čeličnih užadi. Prednost sintetičke užadi visoke čvrstoće je manja masa i mogućnost rada na užnicama manjeg promjera. Krajevi užadi bit će upleteni tako da tvore omču za pričvršćenje na zatezač i glavu kobilice. Takvo, već upleteno uže, moguće je naručiti kod certificiranog proizvođača [13].

Sigurnost užeta je: (9)

$$S = \frac{MBL}{F} = \frac{210}{40} = 5.25 \quad (9)$$

#### 4.2.6. Užnice

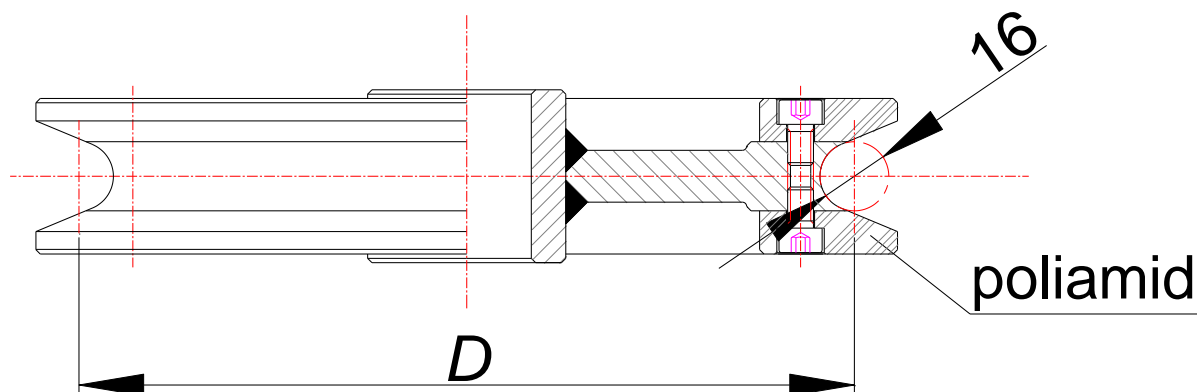
Uže se do glave kobilice vodi preko užnica. Usvajaju se užnice osnovnog promjera

$D = 180\text{mm}$ , pa je:

$$\frac{D}{d_u} = \frac{180}{16} = 11.25$$

Za ovaj tip užadi minimalni preporučeni omjer je 10.

Pri jedrenju užnice su u morskoj vodi pa će se izraditi u kombinaciji nehrđajućeg čelika i poliamida PA60 [Slika 28].



Slika 28. Užnica u kombinaciji nehrđajućeg čelika i poliamida

Uležišiti će se kliznim ležajem od kompozitnog materijala s teflonskim slojem. Ovi ležajevi ne zahtijevaju podmazivanje, što je osim jednostavnijeg održavanja i prednost sa stajališta očuvanja okoliša.

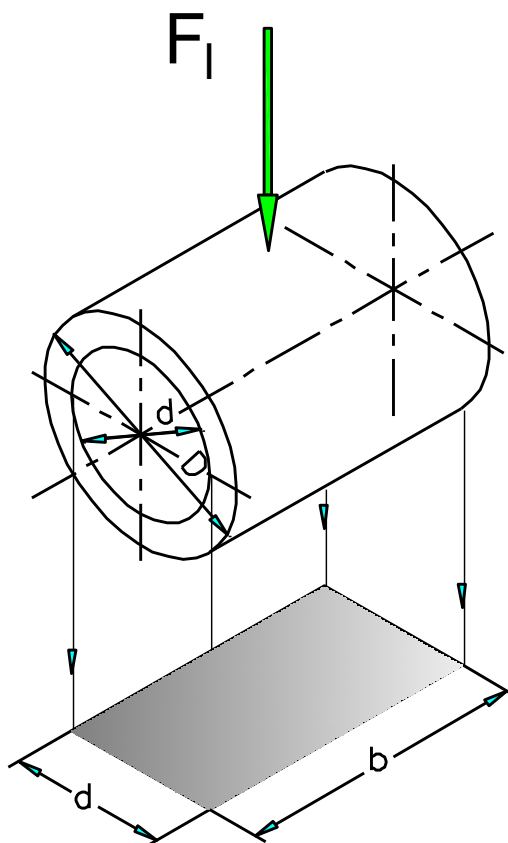
Pri obuhvatnom kutu od  $180^\circ$ , sila na ležaj jednaka je dvostrukoj sili u užetu i iznosi:

$F_1 = 2F = 80 \text{ kN}$  i prema ovom opterećenju dimenzionirati će se ležaj.

Izabire se ležaj (ležajna čahura) proizvođača Deva [14]. Ležajna čahura je dimenzija  $\varnothing 25/\varnothing 30 \times 40 \text{ mm}$ . Materijal čahure je deva-tex s najvećim dopuštenim dinamičkim tlakom  $p_{\text{dop}} = 140 \text{ MPa}$  i faktorom trenja  $\mu = 0.02 \div 0.1$ , a zavisno o radnih uvjeta.

Tlak u ležaju [Slika 29]: (10)

$$p = \frac{F_1}{d \cdot b} = \frac{80 \cdot 10^3}{25 \cdot 40} = 80 \text{ MPa} < p_{\text{dop}} = 140 \text{ MPa} \quad (10)$$



**Slika 29. Ležajna čahura s nosećom površinom**

Ležajna osovinica – svornjak  $\varnothing 25e7$  izradit će se iz nehrđajućeg čelika tvrdoće više od 180 HB i površinske hrapavosti Ra0.4.

Za rad u morskoj vodi proizvođač ležaja preporučuje materijal osovinice X3CrNiMoN27-5-3 (MN 1.4460) [15].

Užnica s ležajnom čahurom prikazana je na Crtežu 5 [Crtež 5].

### 4.3. Izbor hidrauličkog sustava

Za zakretanje kobilice koristit će se otvoreni hidraulički sustav s pumpom konstantne zapremnine.

Potreban protok hidrauličkog sustava

Hod hidrauličkog cilindra je  $h=400$  mm, a promjer je  $D=70$  mm. Pri ostrim manevrima broda potrebno je da kobilica iz jednog u drugi krajnji položaj dođe za vrijeme od cca  $T = 16$ s, pa je protok: (11)

$$Q = \frac{A \cdot h}{T} = \frac{\frac{D^2 \pi}{4} \cdot h}{T} = \frac{\frac{0.070^2 \pi}{4} \cdot 4}{16} = 0.0962 \text{ l/s} \quad (11)$$

Odnosno

$$Q = 5.77 \text{ l/min}$$

#### 4.3.1. Izbor hidrauličke pumpe

Pumpa će se pogoniti istosmjernim motorom brzine vrtnje oko  $n = 3000$  o/min, pa je potrebna teoretska specifična zapremnina pumpe (12)

$$q_t = \frac{Q}{n} = \frac{5.77 \cdot 10^3}{3000} = 1.93 \text{ cm}^3/\text{okr} \quad (12)$$

Zbog volumetričkih gubitaka u pumpi, koji ovise o radnom tlaku, potrebno je odabrati pumpu nešto veće specifične zapremnine.

Prema ovoj zapremnini bira se zupčasta pumpa kao:

Parker PGP502-0025, kojoj je:

- najveći radni tlak  $p_{\max} = 280$  bara
- specifična zapremnina  $q = 2.5 \text{ cm}^3/\text{okr}$
- najveća dopuštena brzina vrtnje  $n = 4500$  o/min [16]

Radi sigurnosti pogona uz elektromotornu pumpu ugradit će se ručna klipna pumpa zapremnine  $q = 40 \text{ cm}^3/\text{ciklusu}$  i najvećeg tlaka od 200 bara.

#### 4.3.2. Izbor elektromotora za pogon pumpe

Potrebna najveća snaga elektromotora (13)

$$P = \frac{Q \cdot p}{\eta_{\text{meh}}} = \frac{q \cdot n \cdot p}{\eta_{\text{meh}}} = \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 250 \cdot 10^5}{60 \cdot 0.95} = 2190 \text{ W} \quad (13)$$

Odnosno potreban najveći moment motora je: (14)

$$M_{\max} = \frac{P}{\omega} = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot 2190}{\pi \cdot 3000} = 6.97 \text{ Nm} \quad (14)$$

U slučaju da se kobilica zakreće iz neutralnog položaja prema krajnjem, moment na glavi kobilice se povećava od nula do maksimalne vrijednosti. Izračunani najveći moment motora će se pojaviti u trenutku kada je kobilica horizontalna i uz dinamički faktor  $\varphi = 1.2$ .

Za siguran pogon važno je da odabrani motor može razviti izračunani moment od nekoliko sekunda. S obzirom na način jedrenja radno stanje elektromotora se može definirati kao kratkotrajno  $S_2 = 1 \text{ min}$  i intermitirano – periodički  $S_3 = 5\%$ , odnosno zakretanje kobilice u najnepovoljnijim uvjetima svako 5,5 minuta.

Prema ovoj snazi i brzini vrtnje izabire se istosmjerni, serijski uzbuđeni elektromotor, 12V tip: AMJ5226 12 V 2.1 kW,  $S_2=1 \text{ min}$ ,  $S_3 = 5\%$ , proizvođača Iskra [17].

Karakteristika motora dana je na Slici 30 [Slika 30].

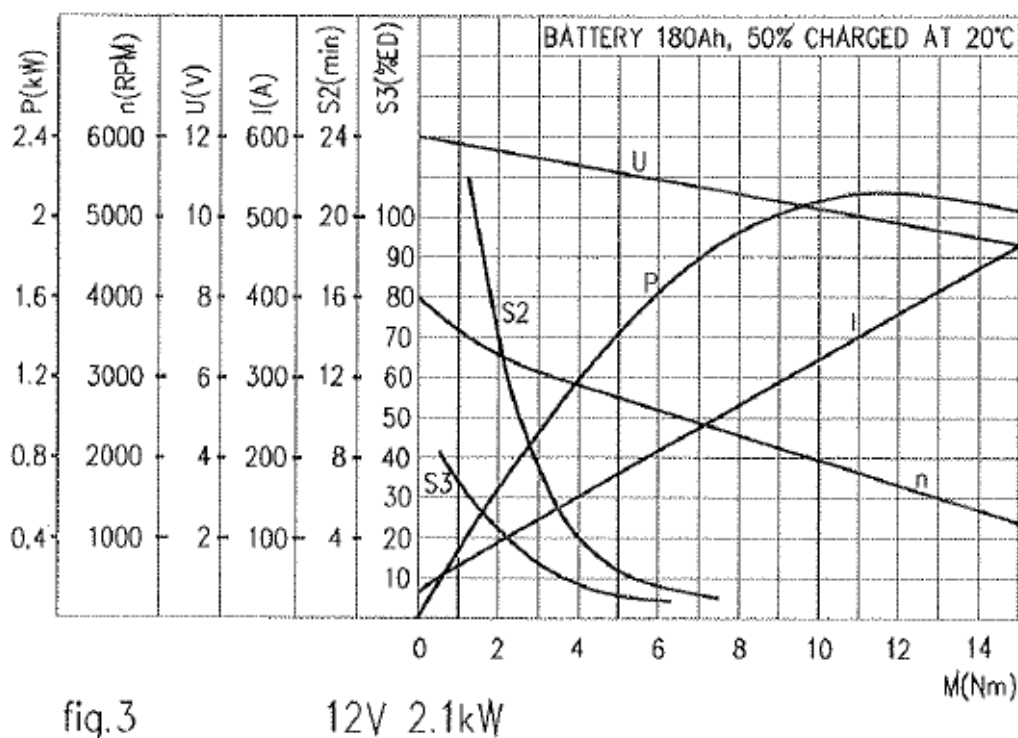


fig.3

12V 2.1kW

**Slika 30. Karakteristika elektromotora za pogon pumpe [13]**

Iz karakteristike motora vidljivo je da će pri najvećem momentu  $M_{\max} = 6.97 \text{ Nm}$  brzina motora biti oko  $n = 2400 \text{ o/min}$ , a pri manjim opterećenjima, npr. za moment  $M = 2 \text{ Nm}$ , brzina vrtnje motora će biti oko  $3500 \text{ o/min}$ .

Pri najvećem momentu motor „poteže“ struju od  $I = 300 \text{ A}$  pa je sukladno ovome potrebno izabrati odgovarajuću akumulatorsku bateriju.



### 4.3.3. Cjevovodi

Najveći protok hidrauličkog ulja ostvarit će se pri manjim opterećenjima, odnosno pri najvećim brzinama vrtnje elektromotora i iznosit će:

$$Q_{\max} = q \cdot n_{\max} = 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 3500 = 8.75 \text{ l/min}$$

U tlačnim hidrauličkim cjevovodima dopuštaju se brzine strujanja oko  $5 \div 8 \text{ m/s}$

$$Q_{\max} = A \cdot v = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot v \xrightarrow{\text{slijedi}} d \geq \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8.75 \cdot 10^3}{60 \cdot \pi \cdot 500}} = 0.609 \text{ cm}$$

Za tlačne cjevovode u sustavu izabire se hidraulička cijev od nehrđajućeg čelika Ø12x2, pa je brzina strujanja kroz cijev (15)

$$v = \frac{Q_{\max}}{A} = \frac{8.75 \cdot 10^3}{60 \cdot \frac{0.8^2 \cdot \pi}{4}} = 290 \text{ cm/s} = 2.9 \text{ m/s} \quad (15)$$

Za povratne cjevovode preporučaju se brzine strujanja oko  $2 \text{ m/s}$  pa se za povratne vodove izabire cijev od nehrđajućeg čelika Ø15x2, pa je brzina strujanja kroz cijev (16)

$$v = \frac{Q_{\max}}{A} = \frac{8.75 \cdot 10^3}{60 \cdot \frac{1.1^2 \cdot \pi}{4}} = 153 \text{ cm/s} = 1.53 \text{ m/s} \quad (16)$$

Usisne cjevovode preporučaju se brzine strujanja  $0.8 \div 1.0 \text{ m/s}$  pa se za usis izabire cijev od polimernih materijala unutarnjeg promjera Ø14 mm, pa je brzina strujanja kroz usisnu cijev (17)

$$v = \frac{Q_{\max}}{A} = \frac{8.75 \cdot 10^3}{60 \cdot \frac{1.4^2 \cdot \pi}{4}} = 94.7 \text{ cm/s} = 0.947 \text{ m/s} \quad (17)$$

### 4.3.4. Spremnik hidrauličkog ulja

U maksimalno izvučenom cilindru nalazi se oko 1.6 litara ulja, pri tom je drugi cilindar uvučen. Ukupna količina hidrauličkog ulja u kompletnom sustavu je oko 3 litre. U radu se praktički ne mijenja ova količina ulja, tako da je i razina ulja u spremniku konstantna. Radi smanjenja ukupne težine, koristit će se spremnik s minimalnom količinom hidrauličkog ulja potrebnom za funkcioniranje sustava. Zbog velikog naginjanja broda spremnik će se izvesti u obliku vertikalno postavljene cijevi od polimernog materijala. U slučaju da je materijal spremnika transparentan, može se izostaviti uljokaz. Za spremnik će se koristiti cijev promjera Ø100 i visine 500 mm. Na vrhu cijevi je povratni i naljevni filter. Motorna i ručna pumpa hidrauličko ulje usisavaju s donje strane cijevi. Usisna crijeva su iz polimernih, transparentnih materijala. Maksimalna zapremnina spremnika je 4 litre ulja, a normalno će sadržavati oko 2.5 litre ulja. Ukupna količina ulja u sustavu je 5.5 litara.

#### 4.4. Opis hidrauličkog sustava

Za zakretanje kobilice razvit će se hidraulički sustav u tri varijante.

Prva varijanta će imati upravljanje zakretanja kobilice ručnim on/off razvodnim ventilom kojim se ne može (jednostavno) upravljati brzinom zakretanja kobilice.

Druga varijanta će imati ručni proporcionalni razvodni ventil s LS regulacijom koja je energetski učinkovitija i smanjuje zagrijavanje hidrauličkog ulja pri brzinama manjim od najveće moguće. Proporcionalni ventil omogućava punu kontrolu brzine zakretanja kobilice i njeno usklađenje s brzinom promjene opterećenja vjetrom.

Treća varijanta imat će proporcionalni razvodni ventil s LS regulacijom kojim se može upravljati ručno, ali i električki, daljinski što je posebno zgodno jer se zakretanjem kobilice može upravljati s više mjesta na brodu. Umjesto komande povezane fleksibilnim kabelom s razvodnikom može se izvesti i bežična radio komanda s kojom skiper ima najveće pogodnosti pri upravljanju.

##### 4.4.1. Opis prve varijante hidrauličkog sustava

Hidraulička shema ove varijante prikazana je na Crtežu 1 [Crtež 1]. Zupčasta pumpa  $q = 2.5 \text{ cm}^3/\text{okr}$  (1) usisava hidrauličko ulje iz spremnika (13), pogoni se istosmjernim elektromotorom snage 2.1 kW. Hidrauličko ulje preko nepovratnog ventila (9) potiskuje u tlačni cjevovod. Paralelno elektromotornoj pumpi nalazi se ručna pumpa kapaciteta  $q = 40 \text{ cm}^3/\text{ciklusu}$ . Tlačni vod je od prevelikog tlaka osiguran sigurnosnim ventilom (14) postavljenim na tlak  $p_{\max} = 250$  bara. Tlak u tlačnom cjevovodu očitava se na manometru (15). Ulje pod tlakom dovodi se ručno upravljanom razvodnom ventilu (5). U srednjem položaju spojen je tlačni i povratni vod, tako da se zalet pumpe može izvesti u rasterećenom stanju. Ovo smanjuje zagrijavanje sustava pri radu pumpe u standby režimu. Pomicanjem ručke razvodnog ventila kobilica se zakreće u jednu ili drugu stranu. Razvodni ventil ostaje u položaju u kojem se zatekao (ne vraća se automatski u srednji položaj). Iza razvodnog ventila nalazi se hidraulički upravljani dvostruki blokirajući ventil (8). Zadatak ovog ventila je da potpuno zatvori hidrauličko ulje u cilindrima i s tim blokira kobilicu u zatečenom položaju. Blokada se ostvaruje automatski kad je ručka razvodnika u srednjem položaju. Blokirajući ventil (8) potrebno je postaviti što bliže hidrauličkim cilindrima jer će bilo kakav lom fleksibilnih crijeva ispred blokirajućih ventila automatski blokirati kobilicu. U slučaju otkaza hidrauličkog sustava, otvaranjem slavine (7) spajaju se cilindri (3) i (4) na isti tlak te se pod utjecajem vlastite težine bulba kobilica automatski vraća u neutralni položaj. Prilikom spuštanja bulba (vraćanje kobilice u neutralni položaj) potencijalnu energiju bulba potrebno je pretvoriti u toplinsku energiju hidrauličkog

ulja. Ovo se ostvaruje dvostrukim prigušnim ventilom (6). Zbog ovog ventila pri otvaranju slavine (7) kobilica će se polako vratiti u neutralni položaj. Dovođenjem hidrauličkog ulja ispod klipa jednog cilindra, zbog njihove povezanosti uže tom istodobno će dolaziti do uvlačenja klipnjače drugog cilindra. Hidrauličko ulje uvijek se dovodi ispod klipa cilindra (cilindri su jednoradni). U slučaju propuštanja hidrauličkog ulja na brtvama klipa ulje bi se drenažnim vodom vraćalo u tank. Ovaj vod nije pod tlakom te će se izvesti fleksibilnim, transparentnim crijevom radi jednostavnijeg nadzora ispravnosti brtava cilindra. Povratno hidrauličko ulje se vraća u spremnik preko povratnog filtera s optičkom kontrolom zaprljanosti (12). Na spremniku se nalazi i uljokaz s termometrom. Ulje se u spremnik ulijeva preko naljevnog filtera (11). Zbog smanjenja težine spremnik se izvodi od polimernih materijala.

#### **4.4.2. Opis druge varijante hidrauličkog sustava**

Hidraulička shema ove varijante prikazana je na Crtežu 2 [Crtež 2]. Razlika u odnosu na prvu varijantu je što je sigurnosni ventil i ručni proporcionalni hidraulički ventil integriran u upravljačkom bloku (5). Upravljački blok ima dvije cjeline, pumpni i ventilski modul. Proporcionalni razvodni ventil se oprugama drži u srednjem položaju pri čemu su radni vodovi spojeni na povratni vod, a tlačni vod je zatvoren. Tada se dobava pumpe zatvara preko sigurnosnog ventila s oprugom (2.1), smještenom u pumpnom modulu, a koja osigurava standby tlak od cca 20 bara. Na ovaj način se u standby režimu angažira minimalna energija. Odmicanjem ručke razvodnika iz centra standby tlak se dovodi radnim vodovima, a on se potom pilot vodom dovodi do sigurnosnog ventila kome se povećava radni tlak. Ovo se ponavlja dok na sigurnosnom ventilu nije tlak dovoljan da izvrši potrebnu radnju i pokrije gubitke tlaka u cjevovodima i razvodniku. Tlak u pilot vodu se ograničava sigurnosnim ventilom (2.2). Ovakav način automatskog postavljanja sigurnosnog ventila (2.1) na vrijednost koja odgovara trenutnom opterećenju naziva se LS regulacija (Load Sensing).

#### **4.4.3. Opis treće varijante hidrauličkog sustava**

Hidraulička shema ove varijante prikazana je na Crtežu 3 [Crtež 3]. Razlika u odnosu na drugu varijantu je u pumpnom modulu u kojem se odvaja dio ulja potreban za pokretanje klipa u proporcionalnom razvodnom ventilu. Dodatak se sastoji iz mlaznice (3.1), ventila za regulaciju tlaka (3.2) i sigurnosnog ventila (3.3). Radni tlak ove grupe je oko 25 bara. U sklopu razvodnog ventila je i električki modul kojim se promjenom napona upravlja proporcionalnim razvodnim ventilom. Upravljanje je opcionalno moguće izvesti i bežično,

radio vezom. U slučaju otkaza u električnom dijelu upravljanja, upravljati se ventilom može ručno jednako kao u drugoj varijanti.

Svi elementi zakretnog mehanizma prikazani su u Crtežima 4-7 [Crtež 4] [Crtež 5] [Crtež 6] [Crtež 7].

## **5. Montaža uređaja za zakretanje kobilice**

### **5.1. Zaštita sustava od nepovoljne okoline prije montaže**

Prije same montaže sustav je potrebno zaštititi od nepovoljnih utjecaja. S obzirom na izloženost sustava nepovoljnoj atmosferi, blizini vode, slane vode i vlage, iznimno je bitna zaštita u vidu zaštitnih premaza koji sprječavaju oksidaciju i korodiranje materijala komponenti. Zaštitni premaz u vidu boje apliciran je na sve površine izložene atmosferi, na kojima je to moguće. Posebnim zaštitnim premazom štiti se dio sustava zakretanja kobilice koji je u dodiru s morem. To se odnosi na glavu cilindra i donju užnicu koji je premazan antivegetativnim premazom. Postoji vrsta antivegetativnih premaza koja može biti naknadno aplicirana na dijelove koji su u kontaktu s morem i to preko bilo kakve vrste boje. Ako je brod izrazito regatni, nakon svake regate vadi ga se iz mora i za pretpostaviti je da je antivegetativna zaštita u tom slučaju suvišna.

Na isti dio na koji je apliciran antivegetativni premaz potrebno je postaviti i komade cinka, „cink protektore“, koji su u direktnom kontaktu s metalom na kojega se montiraju. Na mjestu dodira cink protektora i metala koji zaštićuje ne smije biti nikakvih premaznih slojeva. Uloga cinka je da zaštiti metalne dijelove koji su izloženi moru odnosno galvanskoj struji.

### **5.2. Montaža hidrauličkog sustava**

Sve dijelove hidrauličkog sustava nastoji se pozicionirati nisko u brodu, tako da težište broda bude što niže. Istovremeno je potrebno odabrati poziciju na kojoj oni neće dolaziti u izravan dodir s vodom ili morem, koji su neizbježni u svakom brodu uslijed kondenzacije vlage ili prodora mora.

### **5.3. Montaža cilindra užnica i užeta**

Korake montaže slijediti usporedno s nacrtom sklopa hidrauličnog cilindra i užeta [Crtež 4].

1. Fiksirati jedan kraj proračunatog užeta na zatezač kroz upletenu omču te osigurati zatic osiguračem.
2. Fiksirati zatezač s užetom na konstrukciju broda prema nacrtu. Vijak ne pritegnuti već ga ostaviti maksimalno popuštenog.
3. Provući hidraulički cilindar s gornje strane cilindra kompozitnog kućišta i pozicionirati ga u odgovarajućem smjeru.

4. Fiksirati hidraulički cilindar pozicioniranjem prirubnice kroz otvor za inspekciju nepropusne komore pritezanjem pomoću 6 M10 vijaka.
5. Priključiti hidrauličke cijevi na cilindar.
6. Umetnuti klizne ležajeve u užnice.
7. Pozicionirati užnice na bilo koji od pripadajućih nosača, osigurati ih osiguračima na osovinama. Montaža užnica ne određuje njihovu rotaciju.
8. Uže provući kroz otvor na kućištu broda kao što je prikazano na nacrtu.
9. Prebaciti uže preko užnica.
10. Postupak ponoviti i na drugom sklopu cilindra.
11. Pritegnuti zatezač na potrebnu mjeru da osiguramo odgovarajuću duljinu užeta.
12. Pozicionirati kobilicu u srednji položaj te nategnuti užad cilindrima.

Preporuka je po završetku montaže na gornji dio cilindričnog dijela kompozitne konstrukcije kućišta pričvrstiti cilindričnu gumiranu vodonepropusnu navlaku koja štiti klipnjaču, gornju užnicu i uže od okoline, ali i okolinu od njih. Potrebno je da navlaka bude dovoljno duga da ne ograničava gibanje cilindra.

## 6. Održavanje

Održavanje je od izuzetne važnosti za svaki tehnički sustav, naročito u slučajevima kada prilikom loma ili zakazivanja takvog sustava postoji mogućnost nanošenja ozljede ili stvaranja prijetnje po ljudski život. U njih se ubraja i sustav zakretanja kobilice.

### 6.1. Održavanje mehanizma za zakretanje

Mehanizam za zakretanje konstruiran je imajući u vidu njegovo što jednostavnije održavanje. Održavanje se svodi na čišćenje i zaštitu elemenata izloženih moru te vizualnu inspekciju užeta.

Uslijed dugog stajanja broda u moru (pola godine), na antivegetativnoj zaštiti može se formirati morska alga koju treba mehanički odstraniti. Antivegetativni zaštitni sloj čisti se od sloja algi u periodima ovisnim o brzini formiranja istih i to: spužvom, ako je potrebno i finim brusnim papirom, u krajnjem slučaju špatulom. Ako je zaštitni antivegetativni sloj redovno održavan, nanosi se u periodima od dvije do tri godine.

Vizualnu inspekciju užeta trebalo bi vršiti nakon svakog jedrenja, pritom naročito obratiti pažnju na dijelove užeta koji su vanjski po obodu užnica, jer su to područja na kojima će se najprije pojaviti puknuća užeta, te na upletene spojeve s vijkom i kobilicom jer se znaju pojaviti deformacije na spoju uslijed lošeg uplitanja.

### 6.2. Održavanje hidrauličnog sustava i komponenti

Održavanje hidrauličnih sustava podrazumijeva vršenje niza radnji da bi se hidraulični sustav održao ispravnim. Pouzdanost u radu svake komponente pojedinačno i svih kao sustava mora biti visoka. U standardnim izvedbama hidrauličnih sustava nije uobičajeno udvostručivanje elemenata u svrhu povećanja sigurnosti sustava.

Kod razmatranog primjera, broda *Full Pelt*, ugrađene su dvije pogonske pumpe, električna i ručna. Ručna pumpa dio je izvornog rješenja hidrauličnog sustava zakretanja kobilice, dok je električna ugrađena naknadno kako bi se ubrzalo zakretanje kobilice. Nasreću, ručna pumpa pritom nije uklonjena. Unatoč redovitom održavanju sistema, u više se navrata pokazala izuzetno korisnom, štoviše nužnom. Unatoč uobičajenoj praksi, da se u sustav ne ugrađuje zamjenska pumpa, ma kakvu funkciju taj sustav obavljao, u slučaju hidrauličnog sustava zakretne kobilice, iznimno je poželjno imati i ručnu pumpu za slučaj da električna baterija zataji. S obzirom na okolinu u koju je moguć prodor vode i vlage, a u kojoj se električna baterija nalazi, može doći do njenog pražnjenja. Sustav zakretanja kobilice zahtjeva visoku

pouzdanost jer upravlja elementom koji ako nije ispravno upravljan može ugroziti ljudske živote.

Održavanje hidrauličnog sustava može se svesti na tri glavna dijela:

- Izmjena komponenti hidrauličnog sustava prije kvara (preventivno održavanje)
- Pronalaženje i otklanjanje neplaniranih kvarova hidrauličnog sustava
- Čišćenje hidrauličnog sustava [17].

#### **6.2.1. Preventivno održavanje**

Do zastoja hidrauličnih sustava ne bi ni dolazilo kada bi se različitim postupcima dijagnostike i statističkim metodama mogao utvrditi vijek svake komponente zasebno i kada bi se ona prije kvara mijenjala [17]. Ovaj tip održavanja je skup i u većini slučajeva nepotreban, ali je za sustav zakretanja kobilice potreban zbog mogućih posljedica zatajenja sustava. Osim sustava zakretanja kobilice na ovaj način se održava hidraulika zrakoplova.

U sustavu zakretanja kobilice postoji nekoliko razina provjere sustava u svrhu preventivnog održavanja:

- Provjera filtera i njegovog stanja indicira je li potrebno mijenjati pojedine komponente
- Pojava ulja u drenaži hidrauličnih cilindara indicira potrebu za mijenjanjem brtvi na cilindrima
- Zagrijavanje pumpe indicira njenu istrošenost

Ulje hidrauličnih sustava također se mijenja preventivno jer bi u protivnom došlo do zaribavanja sustava.

Kriterij za izmjenu ulja hidrauličkog sustava je promjena nekih fizikalno – kemijskih karakteristika. Tako je kod hidrauličkog ulja dozvoljena promjena:

- Gustoće do 10%
- Viskoznosti do 10%
- Neutralizacijskog broja , ovisno od proizvođača
- Antipjenušavih i deemulzivnih svojstava do vrijednosti definirane proizvođačem
- Sadržaj vode je dozvoljen u tragovima, mehaničkih nečistoća do količine koju dozvoljava određena specifikacija [17].

Kada se govori o radu hidrauličnih sistema i trajanju komponenti osnova za rad bez kvarova i zastoja je čisto ulje.



Najveći problem hidrauličnog sustava zakretne kobilice je oksidacija komponenti zbog nepovoljne atmosfere. U brodu uvijek ima vode ili mora u obliku tekućine ili raspršenih u zraku što dovodi do oksidacije komponenti. Hidraulično ulje sustava zakretanja kobilice puno brže prima vodu nego li ulje klasičnih hidrauličnih sustava. Kada ulje u svom sastavu ima postotak vode veći od dozvoljenog hidraulični sustav oksidira iznutra.

Pretpostavljeni interval izmjene ulja na hidrauličkom sustavu zakreta kobilice je jednom do dva puta godišnje. Uz izmjenu ulja potrebno je vršiti izmjenu filtera.

#### **6.2.2. Postupak pronalaska greške u radu hidrauličkog sustava**

Osnovni i najčešći problem u procesu održavanja hidrauličnog sustava je pronalaženje uzroka poremećaja u radu hidrauličnog sustava [17]. Za pronalaženje uzroka greške u radu potrebno je poznavanje hidrauličnog sustava i znanje iz hidraulike. Ako postoje mjerni uređaji ili priključci moguće je lokalizirati grešku.

Postupak pronalaženja greške u radu hidrauličnog sustava može se podijeliti prema sljedećem:

- a) Pumpa je u zajedničkom krugu s ventilima i izvršnim komponentama. Zato se greška mora tražiti sistematski u svim elementima sistema
- b) Ako u sustavu nije dovoljan tlak, uzrok se traži prvo kod prigušnih ventila ili drugih ventila. Kod ovih ventila neispravnost može biti u kvaru regulirajuće opruge, oštećenju sjedišta ventila ili akumuliranju nečistoća u ventilu
- c) Sljedeći korak traženja greške koja je dovela do pada tlaka u sistemu je ispitivanje upravljačkih ventila i njihovih funkcija
- d) Uzrok nedostatka pritiska može biti i pumpa
- e) Ako je pumpa povremeno preopterećena, a radi unutar područja regulacije tlaka, to je indikacija onečišćenja ulja. Ulje treba filtrirati ili promijeniti
- f) Preopterećenje motora na kraju regulacijskog područja ispituje se preko ventila za ograničenje pritiska
- g) Nedovoljna brzina kretanja klipa hidrauličnog cilindra indicira mogućnost velikih volumetarskih gubitaka na pumpi ili cilindru
- h) Pojava visoke buke indicira na moguće nedostatke u usisnom dijelu sustava. Mogući razlozi su: usisni cjevovod nije uronjen, pa se usisava zrak; usisni filter je pun nečistoća; viskoznost ulja je visoka; rezervoar se ne odzračuje dobro [17].

---

**6.2.3. Čišćenje hidrauličnog sustava**

Slučajevi koji zahtijevaju ispiranje hidrauličnog sustava čistim uljem su: završena montaža, a prije puštanja u pogon, nakon havarije pumpe, ako je došlo do velikog onečišćenja komponenti sitnim česticama metala, i u svim drugim slučajevima kada je došlo do intenzivnog onečišćenja hidrauličnog sustava [17].

Čišćenje sustava vrši se postepeno po komponentama ili sekcijama sustava. Čišćenje se vrši preko filtera, koji se posebno ugrađuje za tu namjenu.

## 7. ZAKLJUČAK

Zakretne kobilice primjenjuju se već više od desetljeća i do danas su postale standardnom opremom velikih regatnih jahti. U posljednje vrijeme sve se više pojavljuju na komercijalnim brodovima većih performansi [18]. Nažalost, još uvijek učestala pojava mehaničkih ili konstrukcijskih zatajenja očit je dokaz da je potrebno i dalje razvijati i usavršavati te sustave. Duga povijest problema povezanih uz sustave zakretanja kobilice uzrokovala je njihovu sporu primjenu na komercijalnim brodovima. To je ujedno oslabilo interes proizvođača i dovelo do visoke cijene takvih sustava.

Ovim radom nastojalo se predložiti i detaljno elaborirati sustav zakretanja kobilice koji nije standardan, ali se pokazao kao zasad najbolje rješenje za manje brodove, veličine oko 40 stopa. Riječ je o sustavu zakretanja kobilice pomoću dva jednoradna hidraulička cilindra i užeta. Na temelju postojećeg sustava, kakav je ugrađen u brod *Full Pelt*, izrađen je konstrukcijski proračun s ciljem smanjenja mase sustava i povećanja sigurnosti kritičnih točaka, odnosno unaprjeđenja postojećeg konstrukcijskog rješenja. Cilj je bio unaprijediti i hidraulički sustav koji upravlja uređajem za zakretanje kobilice uvođenjem novih elemenata, LS regulacije, elektroničkog upravljanja koje može biti upareno radioprijamnikom, te pozicioniranjem blokirajućeg ventila što bliže jednoradnim cilindrima. Uvođenjem LS regulacije riješen je problem pretjeranog zagrijavanja ulja i time omogućeno smanjenje spremnika hidrauličkog ulja, ujedno i mase sustava u cjelini. Elektroničkim upravljanjem radioprijemnikom dobivena je mogućnost zakretanja kobilice s bilo koje pozicije na brodu što je osobito povoljno pri izvođenju manevara, a do najvećeg izražaja dolazi kod samačkog jedrenja. Pozicioniranjem blokirajućih ventila u neposrednu blizinu jednoradnih cilindara osigurava se od neželjenog zakretanja kobilice pri eventualnom zatajenju hidrauličkog sustava.

Dodatan naglasak stavljen je na održavanje sustava za zakretanje kobilice. Pravilno održavanje posebno je važno zbog nepovoljne radne okoline ovih sustava, visoke vlage, prisutnosti vode i mora. Bez obzira na dobro izvedenu konstrukciju, održavanje je neizbježna stavka.

Autorovim osobnim iskustvom u natjecateljskom jedrenju može se potvrditi velika prednost brodova koji imaju zakretnu kobilicu u odnosu na brodove bez iste.

## LITERATURA

- [1] Claughton, A., Clay, O.: *Design Considerations for Canting Keel Yachts*, 18th International HISWA Symposium on “Yacht Design and Yacht Construction”, Amsterdam, 2004.
- [2] Cariboni Caritec, 2008. (katalog)
- [3] Canting keel mechanical actuators, SKF, 2005. (katalog)
- [4] *An Interview with Grant Simmer*, <http://www.harken.com/article.aspx?id=15626>, 3.1.2016
- [5] *Flying Canting Keel-Extraordinary Innovation!*, <http://www.boatdesign.net/forums/sailboats/flying-canting-keel-extraordinary-innovation-30806-15.html>, 3.1.2016.
- [6] Koroman, V., Mirković, R.: *Hidraulika i pneumatika*, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [7] Drexler, P., Faatz, H., et. al.: *Hidraulik Trener*, sv. 3, *Projektovanje i konstrukcija hidrauličkih postrojenja*, Mannesmann Rexroth, Lohr am Main, 1988.
- [8] *Mini 6.50 Keel Walk*, <http://www.sailingworld.com/mini-650-keel-walk>, 3.1.2016.
- [9] *Parker Verschraubungs-Technik*, 2011. (katalog)
- [10] Alfrević, I., ur.: *Temelji inženjerskih znanja*, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [11] Alfrević, I.: *Nauka o čvrstoći I*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1989.
- [12] *Hampidjan*, <http://www.hampidjan.is/>, 10.1.2016.
- [13] *Plus 12 strand Dyneema®*, <http://www.marlowropes.com/industrial-products/d12-plus-ind.html>, 6.1.2016.
- [14] *Sliding bearing - maintenance-free - self-lubricating*, Deva.tex, 2011. (katalog)
- [15] *Parker Pumps and Motors*, 2011. (katalog)
- [16] *Iskra Avtoelektrika d.d. dc motors catalogue*, 2004. (katalog)
- [17] Savić, V.: *Uljna hidraulika 2 – Konstrukcija, proračun i održavanje hidrauličnih sistema*, Dom štampe, Zenica, 1990.
- [18] Cowan, T., McEwen, L.: *Sink or Swing: the Fundamentals of Canting Keel Structures*, 2nd High Performance Yacht Design Conference, Auckland, 2006.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija